



ТАРТУСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**К. Ф. КУДУ**

**О НАЧАЛЬНЫХ СТАДИЯХ РАЗРЯДА  
С ОСТРИЯ В ВОЗДУХЕ**

**(ИССЛЕДОВАНИЕ СЧЕТЧИКА ИОНОВ НА ПРЕИМУЩЕСТВЕННО ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ  
ПОЛУПЕРИОДАХ НАПРЯЖЕНИЯ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ)**

**ТАРТУ 1960**

ТАРТУСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

К. Ф. КУДУ

**О НАЧАЛЬНЫХ СТАДИЯХ РАЗРЯДА  
С ОСТРИЯ В ВОЗДУХЕ**

**(ИССЛЕДОВАНИЕ СЧЕТЧИКА ИОНОВ НА ПРЕИМУЩЕСТВЕННО ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ  
ПОЛУПЕРИОДАХ НАПРЯЖЕНИЯ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ)**

ТАРТУ 1960

KUSTUTATUD

Arh.  
Tartu Olikooli  
RAAMATUKOGU  
11791

Тартуский государственный университет  
Тарту, ул. Юликооли, 18  
Отв. редактор Я. Ю. Рейнет  
Корректор Р. П. Ермакова

Сдано в набор 26/VIII 1959. Подписано к печати 22/I 1960. Бумага 60 × 92, 1/8. Печатных  
листов 7 + 10 вклеек. Тираж 500 экз. МВ-00917. Заказ № НН-2424.

Типография имени Ханса Хейдеманна, Тарту, ул. Юликооли, 17/19.

Цена 4 р. 90 к.

## ВВЕДЕНИЕ

В 1937 году А. Прокофьевым был сконструирован факельный счетчик ионов [1]. Дальнейшее исследование факельного счетчика привело к изобретению другого типа счетчика ионов. Новый счетчик был назван А. Прокофьевым счетчиком ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты. Он описывается в работах Н. Ковалевой [2, 3].

Режим работы факельного счетчика ионов отличается от режима счетчика ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты тем, что наряду с высокочастотным напряжением на рабочий электрод последнего одновременно подан постоянный положительный потенциал значительной величины. Некоторые исследования счетчика ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты проводились Н. Ковалевой [2, 3]. Ею, в частности, указывается, что счетчик обладает весьма большой чувствительностью к небольшим примесям галогенов в атмосферном воздухе.

Все проделанные опыты не позволяли, однако, вполне определенно говорить о механизме работы вышеуказанного счетчика ионов. В работе [2], по словам автора, дано лишь его «... упрощенное схематическое объяснение...». Открытым остался также вопрос о практическом применении счетчика ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты. В своем первоначальном виде широкое использование счетчика

едва ли могло быть осуществлено, хотя бы из-за больших габаритов и высоких рабочих напряжений.

Изложенные обстоятельства являлись причинами дальнейших исследований. Настоящая работа была предпринята для более глубокого изучения механизма действия счетчика ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты, для выяснения возможностей его практического использования. Кроме того, и это, по-видимому, не менее важно, исследования счетчика ионов могут быть полезными также для понимания механизма образования высокочастотного разряда, ибо электрический разряд в счетчике ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты носит характер высокочастотного разряда.

Представленная ниже монография состоит из трех частей.

В первой части рассматриваются некоторые характеристики положительной остривой короны в воздухе при атмосферном давлении. Во второй главе этой части дается краткая характеристика факельного счетчика ионов и счетчика ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты.

Во второй части определяется основное направление исследования, описывается использованная в опытах установка и методика эксперимента.

В третьей части излагаются экспериментальные результаты и дается их обсуждение.

## ЧАСТЬ I

### ГЛАВА I

#### КОРОННЫЙ РАЗРЯД В ВОЗДУХЕ С ПОЛОЖИТЕЛЬНО ЗАРЯЖЕННОГО ОСТРИЯ

Электрический разряд в газах в виде короны имеет место при сравнительно больших давлениях у электродов, обеспечивающих резко неоднородные электрические поля в своих окрестностях [4]. Впервые такая форма разряда наблюдалась в природе в виде свечения от выступающих над земной поверхностью острых предметов, например, от башен церквей или мачт корабля. В средние века это свечение было известно под названием святых огней Эльма, происхождения которого никто, конечно, к явлениям земного электричества не относил.

Первые лабораторные исследования коронного разряда относятся к концу прошлого и к началу настоящего столетий [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. Эти исследования носили, главным образом, качественный характер и часто ограничивались лишь снятием вольт-амперных характеристик разряда. Было замечено, например, что по внешнему виду положительная корона отличается от отрицательной короны [6, 7, 13], что с уменьшением радиуса кривизны электрода пороговая напряженность электрического поля возрастает и что при этом не остается постоянным соотношение между пороговыми напряжениями положительной и отрицательной короны [5, 7, 14]. Удовлетворительного теоретического объяснения эти факты не получили.

Не дали возможности понять механизм коронного разряда и вольт-амперные характеристики разряда, представляющие однако, с другой стороны, большой интерес с точки зрения техники высоких напряжений.

Наиболее удачные работы, позволяющие более определенно говорить о физических процессах в коронном разряде были предприняты Л. Лёбом в 1937 году [15]. Исследования школы Лёба продолжались до последнего времени. Главные результаты этих исследований резюмируются в монографии Л. Лёба [16].

Коронный разряд за рубежом подвергался изучению еще другими физиками, см. например [17, 18, 19, 20, 21, 22, 24, 25, 26]. Эти исследования, за исключением возможно [25 и 26], такого системати-

ческого характера, как работы вышеуказанной школы, не имели.

Из советских физиков короной постоянного напряжения занимались, главным образом, Н. Капцов [4], Г. Александров [27, 28] и другие.

Перед переходом к рассмотрению основных физических процессов в коронном разряде в воздухе заметим, что обширный экспериментальный материал о начальных стадиях этого вида разряда был получен исследователями одного из главных применений короны — учеными, работающими со счетчиками Гейгера-Мюллера, начиная с Е. Резерфорда и Х. Гейгера в 1908 году [29] до настоящего времени. С результатами этих работ можно познакомиться по книге В. Векслера, Л. Грошева, Б. Исаева [30] и по монографии Л. Лёба [16].

---

Вольт-амперная характеристика разряда с положительно заряженного острия в воздухе при атмосферном давлении представлена на рис. 1 (Разрядный промежуток: острие-плоскость, диаметр острия  $d = 1,0 \text{ mm}$ , вершина острия обработана полусферически, длина разрядного промежутка  $L = 8,0 \text{ cm}$ ). Характеристика взята из работы В. Бандела [31].<sup>1</sup>

При небольших разностях потенциалов между электродами ток в разрядном промежутке обусловлен движением имеющихся в нем первичных заряженных частиц — отрицательных и положительных ионов и электронов. С увеличением напряжения все большее количество ионов в единицу времени нейтрализуется на электродах, и ток, следовательно, возрастает (на рис. 1 этот участок характеристики не показан). Возрастание тока продолжается до тех пор, пока число заряженных частиц, появляющихся в единицу времени в чувствительном объеме между электродами, не будет равно числу частиц, улавливаемых за это же время электродами. При достижении состояния равновесия ток

<sup>1</sup> Монтаж составлен нами.

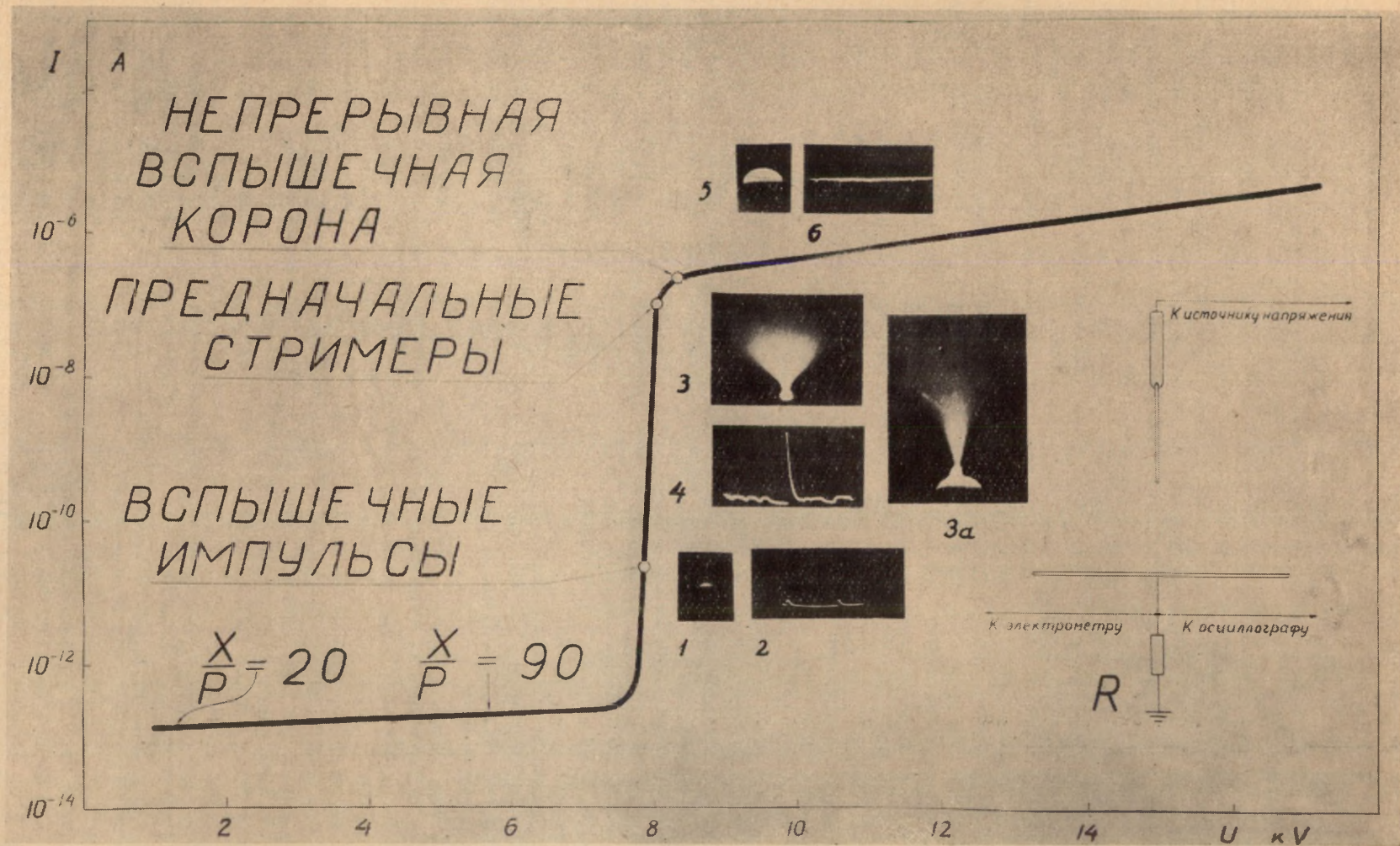


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика разряда с положительно заряженного острия в воздухе при атмосферном давлении,  $d = 1$  мм,  $L = 8,0$  см.

с дальнейшим увеличением напряжения практически не изменится. Из рис. 1 видно, что относительное постоянство тока насыщения, по величине равное примерно  $10^{-13}$  А, сохраняется в весьма широком интервале напряжений. (О токе насыщения мы говорим лишь условно, имея в виду то, что в сильно неоднородном разрядном промежутке он, вообще говоря, не наблюдается).

За током насыщения, начиная с некоторой величины приложенного напряжения, равной в нашем конкретном случае примерно 8,0 кВ, следует новое резкое возрастание тока до  $\sim 10^{-6}$  А. С дальнейшим увеличением напряжения ток возрастает экспоненциально.

Резкий скачок тока сопровождается появлением около вершины острия слабого свечения (рис. 1, фотогр. 1; об условиях фотография см. ниже), распространяющегося от ее поверхности до десятых долей миллиметра [32]. Одновременно осциллограф регистрирует появления своеобразных импульсов тока (фотогр. 2 на рис. 1). Эти импульсы наблюдались впервые Г. Тричелем и были названы им вспышечными импульсами [33]. За первичным вспышечным импульсом в перенапряженном режиме, как правило, за  $\sim 10$   $\mu$ sec [32], следует вторичный импульс [34]. С увеличением напряжения амплитуда отдельных импульсов увеличивается, возрастает также число вторичных импульсов в каждом вспышечном импульсе. В то же время сокращаются временные интервалы как между вторичными импульсами, так и между отдельными вспышечными импульсами [32]. Начиная с определенной величины приложенного напряжения, промежутки времени между вспышечными импульсами не отличаются от соответствующих промежутков между вторичными импульсами. В таком случае все отдельные импульсы сливаются, образуя непрерывную вспышечную корону (фотогр. 5 и 6 на рис. 1). Непрерывную вспышечную корону, таким образом, можно рассматривать как вспышечный импульс, состоящий из бесконечного числа следующих один за другим вторичных импульсов.

Описанная последовательность событий обычно нарушается тем, что при напряжениях выше порога вспышечных импульсов, но ниже порога непрерывной вспышечной короны разряд, вместо бокового развития по поверхности острия, распространяется в глубину разрядного промежутка в виде узкого, исходящего от острия слабо светящегося нитевидного канала. Ширина канала в условиях нашей геометрии разрядного промежутка не более 0,1 мм [35], длина — порядка одного см.

Впервые в лабораторных условиях последний вид разряда изучался в 1900 году [12]. Называются такие нитевидные разрядные каналы предначальными (pre-onset) стримерами [34] или просто стримерами положительной короны [25, 26]. Некоторым исследователям этот вид разряда известен также под названием кистевого или канального разряда. На рис. 1 приведены фотографии 3 и 3а, полученные при наложении одного на другой примерно  $10^4$  стримеров. На этом же рисунке показана осциллограмма стримера

(фотогр. 4). Впервые предначальные стримеры осциллографировал А. Кип [34]. Он также заметил, что предначальный стример никогда не наблюдается во время распространения вспышечного импульса. С другой стороны, как А. Кип, так и более поздние исследователи короны обратили внимание на то, что почти всегда стример сопровождается возникновением влед за ним вспышечного импульса [34]. Предначальный стример в этом отношении как бы играет роль первичного импульса для ряда вторичных.

С увеличением приложенного напряжения число стримеров в единицу времени возрастает до некоторого максимума и затем, с дальнейшим увеличением напряжения, убывает до нуля. Величина напряжения, при которой это случится, определяет порог непрерывной вспышечной короны.

Перейдем к рассмотрению механизма образования как вспышечных импульсов, так и предначальных стримеров.

При постепенном увеличении приложенного к разрядному промежутку напряжения в определенный момент достигается такая его величина, начиная с которой электрон, находящийся в области высокой напряженности электрического поля около вершины острия, накапливает при своем движении к острию энергию, достаточную для образования вторичных электронов при столкновении с нейтральными атомами или молекулами газа. В воздухе это наблюдается, если  $X/p = 20$  V/cm mmHg ( $X$  — напряженность электрического поля,  $p$  — давление) простирается на расстояние, равное нескольким длинам свободного пробега электрона от поверхности острия [16, 36]. Начиная с такой величины разности потенциалов между электродами, становится возможным образование электронных лавин конечной величины. Образование лавин электронов объясняется и некоторый наклон вольт-амперной характеристики разряда на участке, соответствующем току насыщения [16]. (На рис. 1 указано напряжение, при котором  $X/p = 20$  на самой поверхности острия. То же самое относится к  $X/p = 90$ ).

Покольку главным источником электронов в воздухе являются отрицательные ионы кислорода, то существенного возрастания тока с увеличением напряжения не следует ожидать до тех пор, пока  $X/p = 90$  V/cm mmHg, достаточное для разрушения  $O_2$ , не простирается на расстояние, равное нескольким десятим долям миллиметра от поверхности острия [37].

Распределение напряженности электрического поля, соответствующее порогу вспышечных импульсов, в зависимости от расстояния от поверхности острия приведено на рис. 2 (Графики построены нами для острия  $d = 1,0$  мм и  $d = 0,5$  мм при  $L = 4,0$  см на основе работ [38, 39, 33]). При таких величинах напряженностей электрических полей отдельные лавины состоят примерно из  $10^4$  электронов и положительных ионов [38]. Вследствие развития вспышечного импульса возникает  $1 \cdot 10^7$  —  $2 \cdot 10^7$  ионов [32].

Кроме образования вторичных электронов и ионов, ввиду того, что воздух представляет собой среду, со-

стоящую из нескольких компонентов, должна иметь место и фотоионизация от возбужденных частиц в лавине. На возможность такого процесса указывают работы [40, 41].

Основываясь на вышеизложенных экспериментальных фактах, развитие вспышечного импульса рассматривается происходящим следующим образом. Электрон от отрицательного иона, разрушающегося в области высокого электрического поля около ост-

рия, образует лавину, состоящую из  $\exp \int_{\rho}^{\rho+r_0} \alpha dr$  элек-

тронов и такого же количества положительных ионов,  $r$  — расстояние от поверхности острия,  $r_0$  — длина зоны ионизации,  $\rho$  — радиус кривизны острия,  $\alpha$  — первый коэффициент Таунсенда. Одновременно в лавине образуется  $f \exp \int \alpha dr$  фотонов, имеющих  $\lambda$  ( $\lambda$  — длина волны) такую, что фотоионизация в газе возможна с вероятностью  $f$  при поглощении кванта света нейтральной частицей. Если подобный фотоэлектрон создается около границы зоны ионизации, то он на своем пути к острию создаст новую лавину, по величине примерно равную первоначальной. Условие самоподдерживания лавин, таким образом, можно выписать в виде уравнения

$$\beta f \exp \int_{\rho}^{\rho+r_{0g}} \alpha dr = 1,$$

$\beta$  — вероятность того, что хотя бы один электрон от указанного фотона образуется на расстоянии  $r_{0g}$ ,  $r_{0g}$  — длина первоначальной лавины [16].

Приведенное условие является уравнением, из которого определяется пороговое напряжение вспышечных импульсов. Одновременно оно является и условием самоподдерживания тока в случае положительно заряженного острия, условием которое определяет порог положительной короны в воздухе.

Очевидно, что во вторичной лавине создаются также фотоны, имеющие  $\lambda$  такое, что возможно образование новых электронов около зоны ионизации. Эти электроны в свою очередь являются родоначальниками новых лавин. Процесс образования вторичных лавин продолжается до тех пор, пока вся область высокой напряженности электрического поля около вершины острия не будет занята им. Электроны из лавин быстро нейтрализуются острием. Положительные ионы, имеющие намного большую массу, чем электроны, медленно движутся к плоскости, мешая своим противопологом появлению новых вспышечных импульсов, пока не будут удалены на достаточно большое расстояние от поверхности острия, по М. Амину на расстояние, равное примерно  $2/3 L$  [32].

Наблюдения с фотоумножителем показали, что световые явления, связанные с отдельными вспышечными импульсами, продолжаются не более  $10^{-7}$  sec [32]. Это время и нужно, по-видимому, принимать за время, в течение которого вспышечный импульс образуется и гасится своим собственным пространственным зарядом,

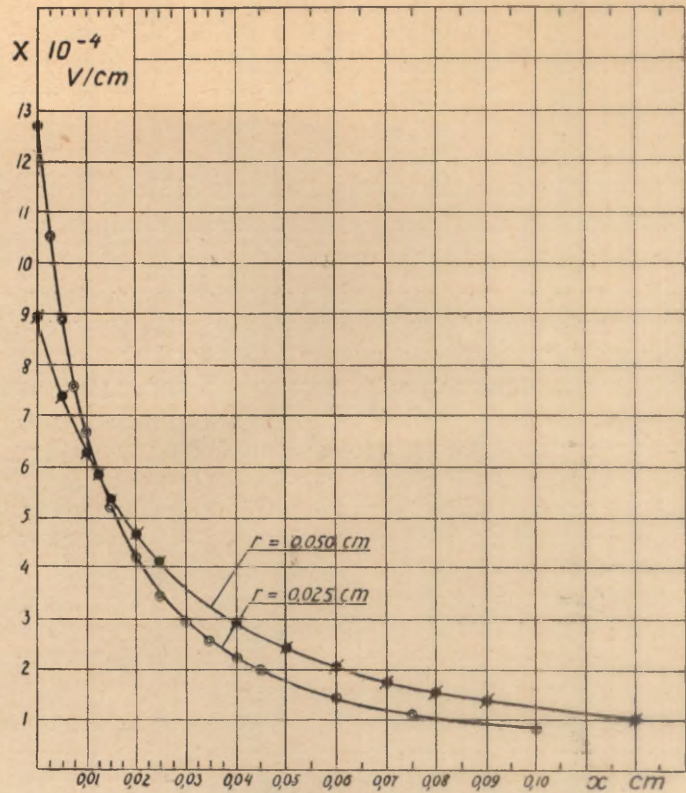


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля в зависимости от расстояния от поверхности острия. Диаметры острия  $d' = 1,0$ ;  $d'' = 0,5$  mm.  $L = 4$  cm. Графики соответствуют порогу вспышечных импульсов.

Появление вторичных импульсов в вспышечном импульсе объясняется сильной неоднородностью электрического поля у вершины острия. По этой причине некоторые участки около поверхности острия очищаются от положительных ионов быстрее других, и, если в этот момент поблизости находится отрицательный ион кислорода или электрон от продуктов предыдущего разряда, то он сразу приводит к образованию нового импульса. Поскольку развитие вторичных импульсов происходит на фоне мешающего действия положительного пространственного заряда от предыдущих импульсов, то число ионов в них меньше, чем в первичном импульсе. По наблюдениям М. Амина [32], вторичный импульс следует за первичным за  $10 - 2 \mu\text{sec}$  (у порога вспышечных импульсов и предначальных стримеров соответственно) и содержит примерно  $10^6$  ионов. Чем больше приложенное напряжение, тем быстрее удаляется положительный пространственный заряд, тем больше вероятность образования вторичных импульсов. При напряжениях выше порога непрерывной вспышечной короны вероятность образования вторичных импульсов настолько большая, что они следуют один за другим непрерывным бесконечным потоком, занимая при этом все большую часть поверхности острия.

Режим от появления отдельных вспышечных импульсов до непрерывной вспышечной короны назы-

васться режимом счетчика Гейгера [37]. В этом режиме число вспышечных импульсов в единицу времени прямо пропорционально начальной ионизации в разрядном промежутке. Механизм образования вспышечных импульсов подобен механизму образования разряда в счетчиках Гейгера [16].

Обратимся к обсуждению механизма образования предначальных стримеров.

Мы видели, что предначальные стримеры появляются при напряжении несколько выше порога вспышечных импульсов и в случае указанной геометрии разрядного промежутка существуют в весьма узком интервале напряжений. Здесь же следует вспомнить, что их существование явилось одной из причин для пересмотра старой теории электрического пробоя газов и создания новой, стримерной теории разряда. Хотя стримерная теория электрического разряда в настоящее время имеет еще качественный характер (разработка количественной стороны вопроса лишь начата [37, 43, 42, 25, 26]), все же она дает удовлетворительное объяснение многим фактам, в том числе и предначальным стримерам.

Нами было уже отмечено, что у порога вспышечных импульсов лавины состоят из  $\sim 10^4$  электронов и положительных ионов, имеющих наибольшую концентрацию у поверхности острия. С увеличением приложенного к разрядному промежутку напряжения число ионов в лавине растет. Электрическое поле пространственного заряда от положительных ионов усиливает общую напряженность поля в сторону катода. При определенной ее величине фотоэлектроны от возбужденных частиц в лавине притягиваются не к свободным частям поверхности острия, а в сторону положительного пространственного заряда первой лавины. Пространственный заряд от этой лавины еще больше усиливает общую величину напряженности поля. Если при этом удовлетворяется условие Ретера-Мика, согласно которому образовавшиеся

$e^{\int \alpha dr} = N_1$  ионов дают дополнительную напряженность поля, по величине сравнимую с приложенным электрическим полем, т. е.  $X_1 = kX$ , здесь  $k = 0,1-1,0$ , то становится возможным образование стримера — развитие разряда в глубину разрядного промежутка путем образования вторичных лавин из-за фотоионизации в газе в направлении наивысших градиентов электрического поля. При этом также предполагается, что среда, где происходит развитие разряда, является хорошим фотоадсорбентом. Этому условию подчиняется воздух, представляющий собой смесь газов. Распространение стримера продолжается до тех пор, пока его вершина не достигает областей слабого электрического поля на некотором расстоянии от поверхности острия.

Первоначально предполагали, что концентрация положительных ионов, необходимая для образования стримера, создается одной лавиной. Однако, поскольку лавина при напряжении, соответствующем порогу

стримеров такой концентрации ионов не обеспечивает, то допускается прохождение нескольких лавин [45, 46]. Такое допущение было косвенно подтверждено и экспериментально [47, 35]. Эти опыты указывают, что необходимая концентрация пространственного заряда, по-видимому, создается во время образования первичного вспышечного импульса [35].

Время образования предначального стримера оценивается равным  $2 \cdot 10^{-8} - 10 \cdot 10^{-8}$  sec [48, 35, 49, 97]. Скорость распространения вершины стримера:  $2 \cdot 10^7 - 6 \cdot 10^7$  cm/sec [35]. Число положительных ионов на 1 cm длины канала предначального стримера  $\sim 10^9$ .

После прохождения стримера разрядный промежуток остается сильно загрязненным пространственным зарядом от положительных ионов. Так как для образования вспышечного импульса необходима меньшая величина напряженности электрического поля, то он и образуется в этих менее благоприятных условиях для развития стримера. Такое сопровождение предначального стримера следующим за ним вспышечным импульсом наблюдается обычно в опыте [34]. С увеличением приложенного к разрядному промежутку напряжения вероятность образования стримера возрастает (увеличиваются лавины) — их число в единицу времени растет. Одновременно становятся больше и вспышечные импульсы — возрастает число вторичных импульсов в каждом из них, поэтому общее загрязнение разрядного промежутка тоже увеличивается. При определенной величине приложенного напряжения последний процесс становится преобладающим, и с дальнейшим увеличением напряжения число стримеров в единицу времени начинает убывать, пока у порога непрерывной вспышечной короны не становится равным нулю.

Снова стримеры появляются перед пробоем тогда, когда приложенные электрические поля многократно превышают величину напряженности электрического поля пространственных зарядов. В этом случае стримеры известны под названием предпробойных стримеров (при  $d = 0,5$  mm,  $L = 6,0$  cm порог предначальных стримеров 5,4 kV, порог предпробойных стримеров  $\sim 40$  kV [34]).

Выше мы отметили, что предначальные стримеры в случае указанной геометрии разрядного промежутка наблюдаются в очень узком интервале напряжений, из-за которого они часто оставались незамеченными исследователями коронного разряда. Ширина интервала напряжений, в котором возникают предначальные стримеры, а также их число в единицу времени при данной величине приложенного напряжения зависят от ряда факторов. Такими факторами являются геометрия разрядного промежутка [50, 25], давление в нем [31, 54], а также начальная ионизация [50, 37]. Сильное влияние на вероятность образования стримера оказывает состояние атмосферы в разрядном промежутке [52, 53, 54, 55, 43, 51, 25, 26]. К. Фитцимонс наблюдал, что развитие предначальных стримеров

становится более благоприятным при наличии в разрядном промежутке окислов азота и влажного воздуха [43]. Последнее обстоятельство послужило даже основой построения физического прибора — малоинерционного гигрометра большой чувствительности [51]. Заметно расширяют интервал напряжений возникновения предначальных стримеров примеси фреона в воздухе [55]. Обсуждение причин влияния некоторых из перечисленных факторов на вероятность образования предначальных

стримеров мы считаем целесообразнее излагать в последней главе настоящей работы.

Этим мы закончим краткий обзор о явлениях положительной короны в воздухе при атмосферном давлении. Ниже мы останавливаемся иногда на понятиях отрицательной короны, говорим о тричелевских импульсах. Поскольку отрицательная корона к данной работе имеет лишь косвенное отношение, то интересующиеся механизмом ее образования отсылаются к работам [56, 16].

## ГЛАВА 2

### ФАКЕЛЬНЫЙ СЧЕТЧИК ИОНОВ. СЧЕТЧИК ИОНОВ НА ПРЕИМУЩЕСТВЕННО ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ПОЛУПЕРИОДАХ НАПРЯЖЕНИЯ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Высокочастотный разряд по сравнению с разрядом на постоянном напряжении является более молодой областью исследования. Первые работы, посвященные высокочастотному разряду, появились лишь в 20—30-х годах настоящего столетия, вскоре после разработки методов генерирования высокочастотных колебаний достаточной мощности. Хотя имеется уже целый ряд работ, поставивших своей целью выяснить отдельные стороны высокочастотного разряда, все же настолько систематическому исследованию, как корона постоянного напряжения, он еще не подвергался.

Общеизвестно, что самоподдерживающийся высокочастотный разряд с острия при напряжениях ниже пробойных в зависимости от частоты питающего разрядный промежуток напряжения существует в виде высокочастотной короны (до частот, равных примерно  $10\text{ MHz}$ ) или факельного разряда (при частотах выше  $10\text{ MHz}$ ) [57, 57a]. Одним из внешних признаков, отличающих как высокочастотную корону, так и факельный разряды от короны постоянного напряжения или напряжения низкой частоты, является относительно яркое свечение первых типов разряда.

Высокочастотная корона в условиях наших опытов представляла собой пучок расходящихся с острия ярких разрядных каналов, хорошо видимых невооруженным глазом и при дневном свете (рис. 3). Длина отдельных каналов порядка нескольких сантиметров.

Исследованиям высокочастотной короны посвящены работы [58, 59, 69, 61, 62]. Основным результатом исследований [58, 59, 60] является установление факта снижения потенциала возникновения высокочастотной короны на 3—20% по сравнению с порогом короны на низкой частоте. Такое снижение авторы вышеуказанных работ приписывают пространственному заряду положительных ионов, накапливающемуся в разрядном промежутке и приводящему к повышению суммарную напряженность электрического поля около электрода с меньшим

радиусом кривизны в отрицательные полупериоды напряжения высокой частоты.

Высокочастотный разряд в форме факельного разряда наблюдался впервые С. Зилитникевичем



Рис. 3. Высокочастотная корона в воздухе при атмосферном давлении.  $d = 1,0\text{ mm}$ ,  $L = 4,0\text{ cm}$ ,  $\nu = 2,5\text{ MHz}$ .

в 1927 г. [63]. Несколько позже факельный разряд был описан К. Бакстером [64] и Х. Хейнрихом [65]. По своему внешнему виду этот вид разряда напоминает пламя свечи или горящего факела (рис. 4). Отдельные части факела — приэлектродное пятно, темное пространство, ядро факела и окружающее его менее яркое свечение. По этим признакам, а также по ряду других характеристик факельный

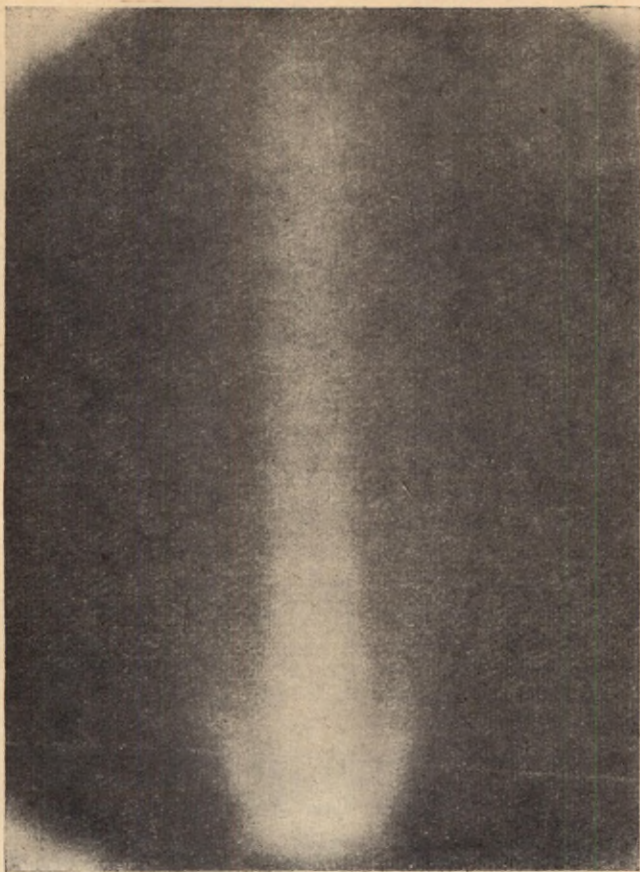


Рис. 4. Факельный разряд в воздухе при атмосферном давлении.

разряд сильно похож на тлеющий разряд постоянного напряжения [66, 67, 68, 69].

Вопросы, связанные с употребляемой факельным разрядом мощностью, рассматривались С. Зилитни-кевичем [63], А. Прокофьевым [70], Л. Поповым, И. Романовым и И. Гарифьяновым [71], а также Г. Солнцевым [74] и А. Кузовниковым [83]. С. Зилитни-кевичем сразу после открытия факельного разряда было установлено, что потенциал его возникновения значительно отличается от потенциала гашения. Этот вопрос подвергался дальнейшему исследованию в работах [69, 72, 73, 75]. Измерениям температуры факельного разряда и исследованию его спектрального состава посвящаются работы [76, 77, 78, 79, 80, 101]. Некоторые вопросы, связанные с переходом высокочастотной короны в факельный разряд, изучались А. Кузовниковым [83], Г. Солнцевым, М. Хохловым, Е. Родиной [82] и Г. Солнцевым [74]. Временную развертку факельного разряда получил В. Трунечек [102]. В работах А. Прокофьева [76, 85] исследовались ионизирующая способность факельного разряда и влияние на разряд постоянного напряжения. Иногда факельный разряд был использован в качестве источника окислов азота [86, 87, 88].

Во всех перечисленных работах факельный разряд изучался, главным образом, в своей устойчивой, установившейся форме. Ниже мы несколько подробнее останавливаемся на результатах исследований, относящихся к начальным стадиям высокочастотного разряда с острия.

Сконструированный А. Прокофьевым факельный счетчик ионов представляет собой разрядный промежуток, острие — плоскость или острие — труба, питаемое высокочастотным напряжением частотой порядка  $10\text{ MHz}$ . Высокочастотный разряд в случае таких частот возникает со значительными статистическими временами запаздывания, зависящими от величины начальной ионизации в разрядном промежутке. Этот факт и был использован при построении факельного счетчика ионов.

В счетчике ионов разряд после своего возникновения необходимо гасить. Прекращение разряда в факельном счетчике достигается путем питания разрядного промежутка импульсным напряжением. В опытах А. Прокофьева импульсное напряжение обычно получали путем питания лампы генератора высокой частоты синусоидальным напряжением промышленной частоты [89].

В случае импульсного напряжения высокочастотный разряд с острия до своей установившейся формы не развивается, а возникает в виде отдельных вспышек разряда. Форма высокочастотной вспышки при  $\nu = 20\text{ MHz}$ , полученная в условиях наших опытов, представлена на рис. 5 (об условиях фотографирования см. ниже).

Возбудителями высокочастотных вспышек являются легкие отрицательные ионы с подвижностями выше  $0,47\text{ cm}^2/V\text{ sec}$  [90, 91]. Существование больших статистических времен запаздывания разряда на высоких частотах объясняется небольшим чувствительным объемом около вершины острия, из которого за полупериод напряжения высокой частоты могут быть извлечены отрицательные ионы, необходимые для образования вспышек разряда [2]. Наблюдения за числом высокочастотных вспышек в единицу времени позволяют судить о концентрации легких отрицательных ионов в объеме разрядного промежутка или окружающего его воздуха.

С целью увеличения чувствительного объема факельного счетчика ионов одновременно с напряжением высокой частоты на острие был наложен небольшой постоянный потенциал положительной полярности. Ход изменения числа высокочастотных вспышек с увеличением приложенного постоянного напряжения представлен на рис. 6 (графики взяты из неопубликованной работы А. Прокофьева). Характеристики на рис. 6 относятся к двум различным начальным концентрациям ионов в разрядном промежутке и сняты при различных величинах напряжения высокой частоты  $U_{\omega}$  (под  $U_{\omega}$  мы всегда будем понимать амплитудную величину напряжения высокой частоты).

Из рис. 6 видно, что при  $U_{\perp}$  выше порога высокочастотного разряда число высокочастотных вспышек в единицу времени с увеличением постоянного напряжения  $U_{\parallel}$  переходит через некоторый максимум и затем, с дальнейшим увеличением  $U_{\parallel}$ , убывает до нуля. Для нового появления высокочастотных вспышек необходимы положительные постоянные потенциалы уже весьма большой величины (см. также [89]). При  $U_{\perp}$  ниже порога факельного разряда наблюдается максимум лишь при значительных значениях  $U_{\parallel}$  («второй» максимум).

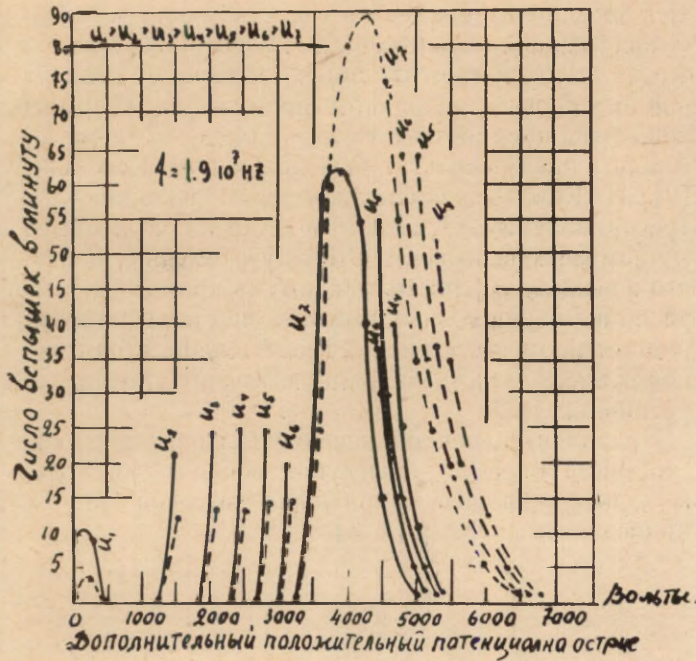


Рис. 6. Зависимость числа высокочастотных вспышек в единицу времени от постоянного потенциала на острие при различных значениях  $U_{\perp}$ . Разрядный промежуток: остриетруба. Вершина острия коническая. Начальная ионизация в случае сплошных кривых в три раза больше, чем в случае пунктирных.

Первоначальное увеличение числа высокочастотных вспышек в единицу времени с увеличением постоянного напряжения А. Прокофьев объясняет увеличением к острию потока легких отрицательных ионов, приводящих к увеличению вероятности возникновения разряда. Дальнейшее уменьшение числа высокочастотных вспышек и их прекращение связаны с уменьшением влияния пространственного заряда положительных ионов и роли отрицательных полупериодов напряжения высокой частоты в образовании высокочастотной вспышки [89].

Режиму работы факельного счетчика ионов соответствует режим, при котором разрядный промежуток питается либо высокочастотным напряжением, либо высокочастотным напряжением и постоянным напряжением небольшой величины одновременно («первый» максимум на кривых рис. 6).

Зависимость от  $U_{\parallel}$  минимальной величины амплитуды напряжения высокой частоты, необходимой для возникновения высокочастотного разряда на смешанном напряжении, представлена на рис. 7. (Под смешанным напряжением мы подразумеваем форму напряжения, полученную путем сложения напряжения высокой частоты и постоянного напряжения. Характеристику, подобную представленной на рис. 7, мы будем называть вольт-вольтовой характеристикой разряда. Вольт-вольтовая характеристика на рис. 7 взята из неопубликованной работы А. Прокофьева).

В широком интервале частот измерения напряжений возникновения высокочастотного разряда были выполнены О. Кабардиным [92]. Он же измерял величину напряжения возникновения высокочастотного разряда на смешанном напряжении. Полученные вольт-вольтовые характеристики имели три ха-

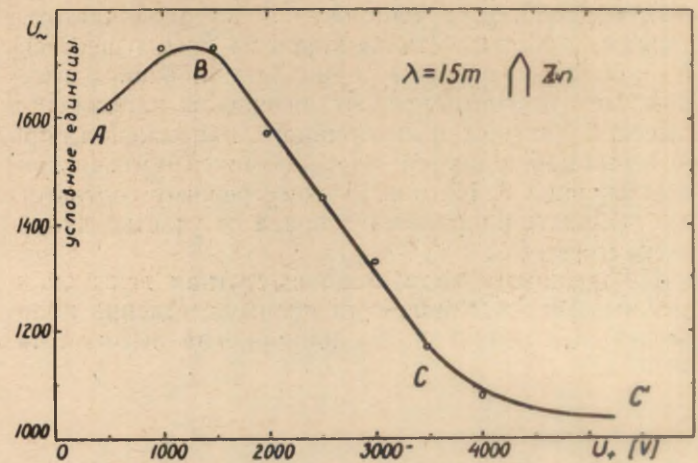


Рис. 7. Зависимость от  $U_{\parallel}$  минимальной величины амплитуды напряжения высокой частоты, необходимой для возникновения высокочастотного разряда на смешанном напряжении. По оси ординат отложены амплитудные значения напряжения высокой частоты. Ось абсцисс — ось постоянного напряжения.

рактерных участка: а) участок АВ (рис. 7), зависящий от частоты высокочастотного напряжения и полярности постоянного потенциала на острие, б) ВС — участок линейного спада, в) СС' — горизонтальный участок (в случае положительно заряженного острия и разрядного промежутка остриетруба на более высоких частотах, справа от точки С на рис. 7, О. Кабардиным иногда наблюдалось некоторое повышение амплитуды напряжения высокой частоты, необходимой для возникновения высокочастотного разряда на смешанном напряжении).

Наиболее важным, на наш взгляд, результатом в вышеуказанных измерениях является установление факта, что на участке линейного спада ВС высокочастотный разряд возникает при напряжениях, равных примерно порогу импульсов короны постоянного напряжения: в случае отрицательного постоянного потенциала — при отрицательных ампли-

туда, равных порогу тричелевских импульсов отрицательной короны, в случае положительного постоянного потенциала на острие — при положительных амплитудных значениях смешанного напряжения, соответствующих порогу положительной короны постоянного напряжения. Изложенные обстоятельства позволили О. Кабардину высказать предположение, что на участке линейного спада высокочастотный разряд, по-видимому, развивается из импульса короны постоянного напряжения — в случае отрицательного постоянного потенциала на острие из тричелевского импульса, в случае положительно заряженного острия из вспышечного импульса или предначального стримера.

После небольшого отклонения в сторону возвращаемся опять к рис. 6. Мы уже отметили, что, кроме факельного счетчика, А. Прокофьевым был предложен другой тип счетчика ионов, названный им счетчиком ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты. Режиму работы счетчика ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты соответствуют интервалы напряжения высокой частоты и постоянного напряжения, при которых наблюдаются «вторые» максимумы на кривых рисунка 6. На рис. 7 этому режиму соответствует область напряжений справа от участка линейного спада *BC*.

По внешнему виду высокочастотная вспышка в режиме счетчика ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой ча-

стоты отличается от высокочастотной вспышки в факельном счетчике. Сходны эти две формы вспышек по яркости свечения и еще тем, что при питании разрядного промежутка немодулированным высокочастотным напряжением обе могут перейти в установившиеся формы, заметно не отличающиеся по внешнему виду друг от друга. Фотография высокочастотной вспышки в режиме счетчика ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты при  $\nu = 20 \text{ MHz}$  приведена на рис. 8.

Из рис. 6 видно, что число высокочастотных вспышек за единицу времени в счетчике ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты сильно зависит от концентрации ионов в разрядном промежутке (большей концентрации соответствуют сплошные кривые). Аналогичный результат был получен Н. Ковалевой [2]. Н. Ковалева наблюдала также влияние электроотрицательных газов в воздухе на число высокочастотных вспышек в единицу времени и нашла, что в режиме справа от максимума кривой на рис. 6 число высокочастотных вспышек при наличии в разрядном промежутке примесей галоидов, в противоположность действию радиоактивного препарата, увеличивается.

Предварительное объяснение механизма работы счетчика ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты приведено в работах [2, 3].



Рис. 5. Высокочастотная вспышка.  $d = 1,0 \text{ mm}$ ,  $L = 4,0 \text{ cm}$ .  $\nu = 20 \text{ MHz}$ .  
 $U = 5,6 \text{ kV}$ ,  $U_{\text{п}} = 0$ .

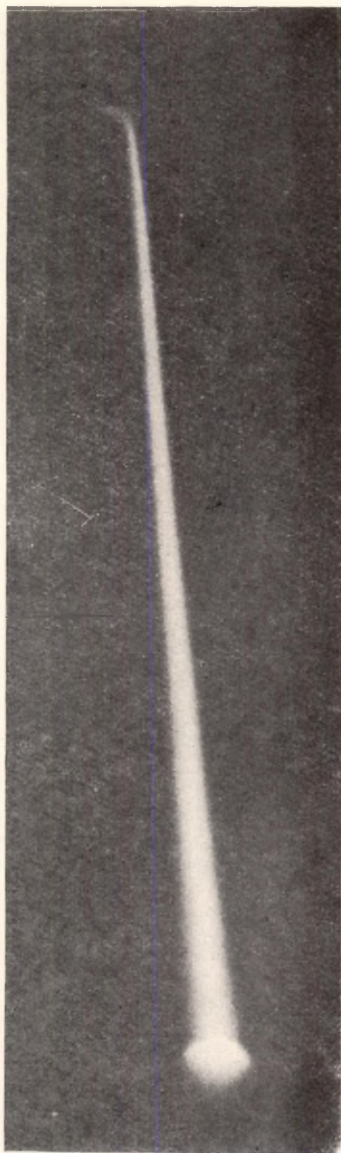


Рис. 8. Высокочастотная вспышка при одновременном питании разрядного промежутка постоянным напряжением и напряжением высокой частоты.  $d = 1,0 \text{ mm}$ ,  $L = 4 \text{ cm}$ ,  $\nu = 20 \text{ MHz}$ .  $U_{\text{п}} = 5,25 \text{ kV}$ ,  
 $U_{\text{в}} = 3,0 \text{ kV}$ .

## ЧАСТЬ II

### А. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

До формулирования непосредственной задачи исследования и выбора методов ее осуществления мы описываем экспериментальные результаты некоторых качественных наблюдений, полученные нами при работе со счетчиком ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты.

В работах Н. Ковалевой [2, 3] влияние начальной концентрации ионов в разрядном промежутке на число высокочастотных вспышек за единицу времени в счетчике ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты исследовалось в весьма узком диапазоне изменения концентрации и при одной паре значений  $U_+$  и  $U_-$  (Небольшим исключением является рис. 8 в работе [2], где счетные характеристики, т. е. зависимости числа высокочастотных вспышек от  $U_-$ , представлены для широкого интервала изменения  $U_-$ . См. также рис. 6 настоящей работы). Общий ход изменения счетных характеристик в зависимости от изменения начальной ионизации остался невыясненным. Нами такие характеристики были получены. Они представлены на рис. 9 (разная концентрация ионов создавалась радиоактивными препаратами различной интенсивности).

Из рис. 9 видно, что с увеличением начальной ионизации  $i_0$ , начиная с определенной ее величины, число высокочастотных вспышек в единицу времени уменьшается с дальнейшим увеличением ионизации при любой величине постоянного напряжения, пока их появление совсем не прекращается. Другими словами, сильной начальной ионизацией можно прекратить вообще возникновение высокочастотных вспышек в счетчике ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты.

Аналогичный результат нами был получен для разрядного промежутка острие-плоскость при освещении поверхности плоского электрода ультрафиолетовым светом от лампы типа ПРК-2.

Кроме наблюдений за числом высокочастотных вспышек в единицу времени, мы наблюдали еще и за тем, как изменится при освещении плоского электрода число стримеров положительной короны по-

стоянного напряжения. (Диаметр острия  $d = 1,5 \text{ mm}$ , вершина полусферическая.  $L = 6,0 \text{ cm}$ . Плоскость алюминиевая. Ширина интервала напряжений существования предначальных стримеров

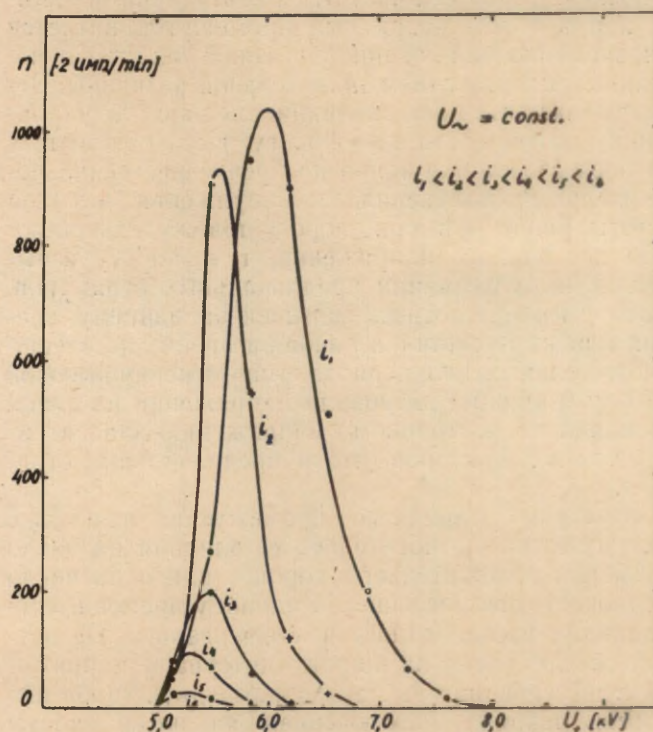


Рис. 9. Зависимость числа высокочастотных вспышек за единицу времени в счетчике ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты от  $U_-$  при различных концентрациях ионов в разрядном промежутке. Начальная ионизация  $i_0$  настолько большая, что высокочастотные вспышки вообще не возникают.

200 V). Освещение плоскости вышеуказанным источником света привело к подобному результату: освещение ультрафиолетовым светом прекратило полностью возникновение предначальных стримеров. (Аналогичное влияние сильной начальной ионизации на вероятность возникновения предначальных стримеров наблюдалось Л. Лёбом и А. Кипом уже в 1938 году [50]).

Подводя итог всему вышеизложенному, необходимо обратить внимание на следующие факты:

В начальных стадиях положительной короны постоянного напряжения самостоятельный разряд в некотором интервале напряжений может иметь место в виде нитевидных каналов, стримеров. Ширина интервала напряжений возникновения предначальных стримеров, а также их число в единицу времени при определенной величине приложенного напряжения зависят от целого ряда факторов. Такими факторами являются:

1. Геометрия разрядного промежутка.
2. Давление воздуха.
3. Начальная ионизация.
4. Наличие примесей посторонних газов в воздухе.
5. Влажность воздуха.

С другой стороны, сконструирован счетчик ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты, работающий в режиме, при котором разрядный промежуток питается одновременно напряжением высокой частоты и постоянным напряжением значительной величины. Величины амплитудных значений смешанного напряжения, соответствующие порогу высокочастотных вспышек в счетчике ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты, равны примерно порогу положительной короны постоянного напряжения, т. е. порогу вспышечных импульсов или предначальных стримеров. Число высокочастотных вспышек за единицу времени в режиме счетчика ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты и ширина интервала напряжений их существования по постоянному напряжению зависят от всех тех же факторов, что и предначальные стримеры.

Геометрия разрядного промежутка, насколько нам известно, относительно ее влияния на число стримеров положительной короны, как и на число высокочастотных вспышек в единицу времени, специальному исследованию не подвергалась. Не изучено ее влияние и на ширину интервала напряжений существования вышеуказанных двух типов импульсов разряда (исключением являются работы [51, 25, 94], относящиеся к предначальным стримерам).

Вышеизложенное относится и к влиянию давления (за исключением работ [31, 54], тоже относящихся к стримерам положительной короны).

Примеси электроотрицательных газов в воздухе расширяют интервал напряжений существования предначальных стримеров положительной короны. В том же направлении, как можно было ожидать по работе [2], и что было подтверждено нашими предварительными наблюдениями, примеси галоидов в воздухе действуют на высокочастотные вспышки в режиме счетчика ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты.

Влияние влажности воздуха на число стримеров короны постоянного напряжения исследовано весьма обширно [43, 31, 51, 25]. Ее влияние на число высокочастотных вспышек в единицу времени было А. Прокофьевым тоже замечено. Специальные исследования в этом направлении были предприняты В. Старковым [93].

Таким образом, несмотря на большое различие во внешнем виде между стримерами положительной короны и высокочастотными вспышками в счетчике ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты (кроме различия во внешнем виде, указанные типы разрядов отличаются еще различной шириной интервалов напряжений их существования), мы имеем много общего между ними. Эта общность выражается в примерном равенстве потенциалов возникновения обеих форм разряда и в подобном реагировании к некоторым внешним воздействиям.

Своей конкретной задачей мы ставили более глубокое изучение связи между высокочастотными вспышками в режиме счетчика ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты и импульсами разряда в начальных стадиях положительной короны, в особенности, предначальными стримерами. Такая постановка вопроса, как нам кажется, должна наиболее успешно обеспечить достижение цели исследования, сформулированной в вводной части настоящей работы.

#### Б. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Применяемая в исследованиях экспериментальная установка состояла из пяти главных узлов:

- а) Разрядные промежутки.
- б) Генератор высокой частоты.
- в) Источники постоянного напряжения и напряжения низкой частоты.
- г) Приборы для визуального и фотографического наблюдений.
- д) Измерительная аппаратура.

Принципиальная схема установки представлена на рис. 10.

- а) Разрядные промежутки.

Конфигурации использованных разрядных промежутков показаны на рис. 10. Разрядный промежуток I состоит из острия и плоскости. Использование разрядного промежутка такого вида позволяет хорошо провести визуальные наблюдения. Он легко воспроизводим, и в некоторых специальных случаях известно распределение электрического поля в нем [33, 37, 38, 24].

Для нас выбор разрядного промежутка острие-плоскость, кроме вышеуказанных причин, важен еще с точки зрения сравнения результатов своих исследований с теми экспериментальными фактами и теоретическими выкладками, которые были получены в результате многочисленных работ исследователей короны постоянного напряжения.

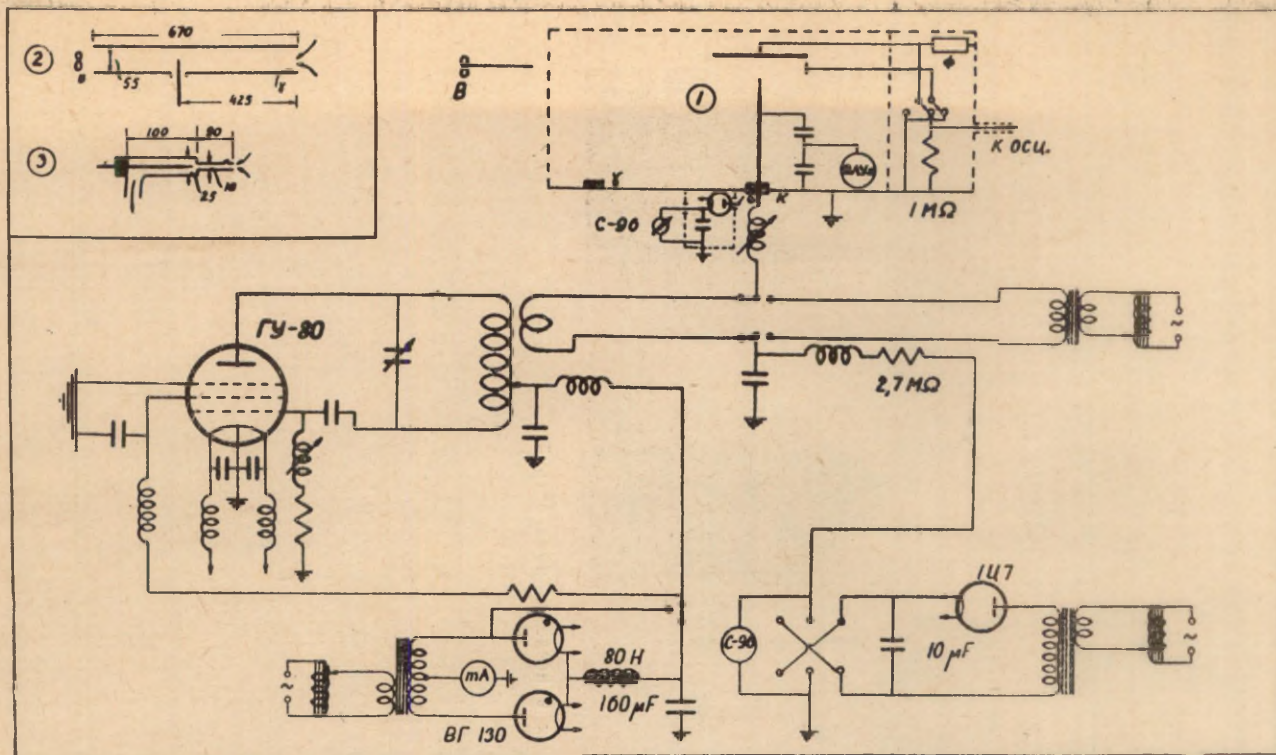


Рис. 10. Принципиальная схема экспериментальной установки.

Плоским электродом в наших опытах являлась отшлифованная медная пластина размерами  $250 \times 400$  мм. Остриями были цилиндрические платиновые проволоки диаметром 1,0 мм (исключение составляет острие 3 на рис. 11, диаметр которого 0,5 мм). Длина всех острий 30 мм. Форма вершины трех острий полусферическая. Полусферическая форма была получена путем обработки острия факельным разрядом. Наряду с остриями описанной формы применялись два острия с конической заточкой. Угол заточки  $70^\circ$ . Вершина одного из конических острий со специальной целью оплавлена факельным разрядом.

Микрофотографии вершин всех использованных острий представлены на рис. 11.

Длина разрядного промежутка во всех опытах была 4,0 см. Расстояние между верхней и нижней пластинами 20 см. Экранировка разрядного промежутка осуществлялась железной сеткой.

В некоторых исследованиях применялись разрядные промежутки конфигурации 2 и 3 (рис. 10, размеры указаны в мм). При работе с разрядными промежутками 2 и 3 использовались острия 2 и 3 соответственно.  $L$  в первом случае было 25 мм. В случае конфигурации 3, острие находилось на расстоянии одного миллиметра от начала более тонкого цилиндра (рис. 10).

б) Генератор высокой частоты

Источником высокочастотного напряжения служил генератор самовозбуждения, собранный по трехточечной схеме на лампе ГУ-80. Питание лам-

пы осуществлялось постоянным напряжением. (Фильтр выпрямителя высокого напряжения содержит дроссель индуктивностью 80 Н и конденсаторы емкостью  $165 \mu F$ . Накал лампы питался напряжением от аккумуляторной батареи). Генератор позволял получить колебания высокой частоты в диапазоне частот 0,65—40 МГц.

Связь острия с генератором высокой частоты была индуктивной. Вариометр в цепи острия позволял настраивать его в резонанс с колебательным контуром генератора высокой частоты. После настройки величина напряжения высокой частоты регулировалась автотрансформатором в первичной цепи выпрямителя. Форма высокочастотных колебаний контролировалась синхроскопом СИ-1.

Наряду с немодулированным высокочастотным напряжением мы в некоторых случаях работали и с импульсным напряжением. Импульсное высокочастотное напряжение было получено путем питания генераторной лампы синусоидальным напряжением промышленной частоты (рис. 10).

в) Источники постоянного напряжения и напряжения низкой частоты

Источником постоянного напряжения служили конденсаторы емкостью в  $20 \mu F$  и  $1 \mu F$ , заряжаемые однополупериодным выпрямителем, собранным на диоде 1Ц7. Величина постоянного потенциала



Рис. 11. Микрофотографии использованных в исследованиях острий.

Диаметр кривизны	1,25 mm	1,0 mm	0,5 mm		
Порог вспышечных импульсов . . . . .	8,05 kV	7,40 kV	5,30 kV	5,95 kV	
Порог предначальных стримеров . . . . .	8,40 kV	7,65 kV	5,45 kV	6,00 kV	5,35 kV
Порог непр. вспышечной короны . . . . .	8,65 kV	8,00 kV	5,75 kV	10—12,5 kV	
Порог тричелевских импульсов . . . . .	8,50 kV	7,75 kV	5,40 kV	5,75 kV	4,30 kV

Таблица 1

Показания диодного вольтметра	$K = \frac{\text{Показания диодного вольтметра}}{\text{Показания вольтметра ВЛУ} - 2}$					
	$\nu = 1,25 \text{ MHz}$	$\nu = 2,5 \text{ MHz}$	$\nu = 5,0 \text{ MHz}$	$\nu = 10,0 \text{ MHz}$	$\nu = 20 \text{ MHz}$	$\nu = 40 \text{ MHz}$
2000 V	52,7	52,0	52,5	52,0	51,8	52,7
3000 V	53,1	52,6	52,7	52,2	51,8	53,1
4000 V	53,4	53,0	53,4	53,5	53,0	53,3
5000 V	53,1	52,6	52,8	52,6	52,6	
6000 V	52,8	52,5	52,5			
	$\nu = 1,25 \text{ MHz}$			$\nu = 2,5 \text{ MHz}$		
	$K_1$ (по показаниям диодного вольтметра)	$K_2$ (по показаниям С-96)	$K_1$	$K_1$	$K_2$	$K_1$
2000 V	51,3	50,7	52,0	52,0	49,0	52,0
3000 V	51,4	53,0	52,2	51,5	52,1	52,1
4000 V	52,5	52,4	53,1	52,6	52,8	53,0
5000 V	52,1	53,3	52,6	52,6	53,4	52,7
6000 V	52,0	53,5	52,6	52,4	53,2	52,5

на острие в пределах 0—15 kV плавно регулировалась автотрансформатором в первичной цепи выпрямителя

Схема получения и питания разрядного промежутка высоким напряжением промышленной частоты показана на рис. 10.

#### г) Приборы для визуального и фотографического наблюдений

Визуальные наблюдения за различными формами разряда проводились стереоскопическим микроскопом МБС-1. Этим же микроскопом контролировалось состояние поверхности острия. Снабжение его фотонасадкой МФ-1 позволило микрофотографировать острия.

Ввиду небольшой светосилы объективов микроскопа МБС-1, микроскоп при фотографировании импульсов разряда не применяли. Фотографии разряда были получены посредством объектива Юпитер-3 (относительное отверстие 1:1,5) на пленку *изопанхром* в 180 ед. ГОСТа.

Осциллографирование импульсов тока разряда осуществлялось по методам, указанным в работе [34]. Импульс тока снимался с сопротивления в 1 МΩ, включенного последовательно разрядному промежутку (рис. 10). Для напряжения высокой частоты плоскость заземлялась дополнительно четырьмя конденсаторами, расположенными симмет-

рично относительно плоскости. Величина емкостей конденсаторов была выбрана так, чтобы показания вольтметров не изменялись при замене заземления плоскости через конденсаторы непосредственным ее заземлением короткими медными стержнями. В наших опытах общая величина заземляющей емкости была 400 pF.

При особенно прецизионных измерениях (см. ниже), а также в случаях, когда необходимо было уменьшить величину RC на входе осциллографа, плоский электрод заземлялся непосредственно толстыми и короткими медными стержнями, а импульс тока разряда снимался с помощью дополнительного электрода, расположенного около края плоскости (метод А в работе [34]).

В осциллографических наблюдениях использовались осциллограф ЭО-7 и синхроскоп СИ-1. В настоящей работе приводятся осциллограммы, снятые осциллографом ЭО-7 по первому способу, т. е. без дополнительного электрода.

#### д) Измерительная аппаратура

Частота генерируемого напряжения высокой частоты измерялась волномерами типа ОМ-33, КВ-5 и УВ-3.

Величина напряжения высокой частоты, как правило, измерялась диодным вольтметром, собранным на лампе типа АГ1006. Анод лампы был непосред-

ственно присоединен к острию (длина соединительных проводов не более 2 см). Схема вольтметра представлена на рис. 10. Через диод AG1006 заряжается конденсатор емкостью в 300  $\mu F$ . Разность потенциалов на обкладках конденсатора измеряется электростатическим вольтметром С-96.

Сравнение показаний диодного вольтметра на низких частотах или на постоянном напряжении с результатами измерений, полученными вольтметром С-96 непосредственно, указало на их идентичность.

Величина напряжения высокой частоты была измерена также ламповым вольтметром ВЛУ-2. Для этого к ВЛУ-2 был изготовлен емкостный делитель. Ламповый вольтметр ВЛУ-2 с делителем градуировался по показаниям вышеописанного диодного вольтметра. Градуировка проверялась перед и после каждой серии измерений. Типичные результаты градуировки, в случае разрядного промежутка 1, приведены в таблице 1. На частоте 1,25 и 2,5 МГц градуировку можно было дополнительно провести непосредственно вольтметром С-96. Данные такого способа градуировки тоже представлены в таблице 1. Описанный способ измерения напряжения вольтметром ВЛУ-2 обычно применялся при значительных величинах смешанного напряжения (свыше 10 кВ) и при отрицательном постоянном потенциале на острие.

Величины постоянного напряжения и напряжения промышленной частоты измерялись диодным вольтметром и вольтметрами типа С-96 и С-95.

Число стримеров положительной короны и высокочастотных вспышек в единицу времени регистрировалось пересчетным устройством от счетчика нейтронов СЧ-3. Импульс тока на вход пересчетного устройства подавался с того же сопротивления, что и на вход осциллографа.

В случаях, когда высокочастотные вспышки нужно было отделить от стримеров положительной короны, счет первых осуществлялся фотоумножителем ФЭУ-2. Импульс тока от ФЭУ-2 и в этом случае подавался на вход пересчетного устройства счетчика СЧ-3.

Начальная ионизация в разрядном промежутке была естественной и могла быть также увеличена радиоактивными препаратами различных интенсивностей или лампой ультрафиолетового света ПРК-2. Какая была начальная ионизация в каждом отдельном случае, будет особо сказано ниже.

Большинство опытов было сделано в лабораторном воздухе, влажность и температура которого контролировались психрометром и термометром соответственно.

В отдельных случаях присутствовали в воздухе небольшие примеси хлора. Хлор был получен обычным методом из KCl посредством KMnO<sub>4</sub>.

Во всех опытах разрядный промежуток для удаления продуктов разряда обдувался воздушным потоком, созданным вентилятором В (рис. 10). Скорость воздушного потока была 4 м/сек.

## ЧАСТЬ III

### ГЛАВА I

#### ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРЯДА ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ НАЛОЖЕНИИ НА ОСТРИЕ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ И НАПРЯЖЕНИЯ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

##### А. СИСТЕМАТИЗИРУЮЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРЯДА (РАЗРЯДНЫЙ ПРОМЕЖУТОК 1, ОСТРИЕ 2)

В отличие от предыдущих работ, связанных с исследованиями разряда с острия при одновременном наложении на него постоянного напряжения и напряжения высокой частоты, нами для устранения влияния модуляции на условия возникновения разряда высокочастотное напряжение было выбрано немодулированным.

Измерения пороговых значений напряжения возникновения отдельных видов разряда проводились осциллографом ЭО-7 и измерительной аппаратурой, описанной выше.

Методика измерений была следующей:

Диодным вольтметром или вольтметром С-96 определялись пороговые напряжения импульсов короны постоянного напряжения.

Напряжением возникновения вспышечных импульсов считалось то минимальное напряжение, при котором осциллограф обнаруживал появление вспышечных импульсов наименьшей величины при предварительном максимальном усилении их усилителем осциллографа.

С дальнейшим увеличением приложенного к электродам напряжения амплитуда и длительность вспышечных импульсов возрастали, как это наблюдалось раньше и другими авторами. При определенной величине приложенного напряжения появились стримеры. Минимальное напряжение, необходимое для возникновения стримеров положительной короны, принималось за их пороговое напряжение.

С увеличением напряжения выше порога стримеров их число в единицу времени сперва возрастало до некоторого максимума, а затем с дальнейшим увеличением напряжения убывало до нуля. Установившаяся непрерывная вспышечная корона.

После измерений пороговых напряжений различных импульсов короны на постоянном напряжении

напряжение, приложенное к разрядному промежутку, было последовательно уменьшено на 500, 1000, 1500... вольт ниже порога вспышечных импульсов, и на острие налагалось напряжение высокой частоты  $U_{\sim}$ .  $U_{\sim}$  было увеличено до тех пор, пока осциллограф не обнаруживал появления каких-либо импульсов тока. Значение амплитуды смешанного напряжения  $U_{=} + U_{\sim}$ , соответствующее этому моменту, принималось за пороговое напряжение самостоятельного разряда на смешанном напряжении при указанных  $U_{=}$  и  $U_{\sim}$ . Посредством дальнейшего увеличения  $U_{\sim}$  или  $U_{=}$  определялись пороговые значения  $U_{=} + U_{\sim}$  других форм разряда на смешанном напряжении. Последним было измерено пороговое напряжение разряда при  $U_{=} = 0$ .

Измеренные пороговые напряжения графически изображаются вольт-вольтовыми характеристиками разряда. На вольт-вольтовых характеристиках, как нами было уже отмечено, по осям абсцисс отложены величины постоянного напряжения  $U_{=}$ , по осям ординат — амплитудные значения напряжения высокой частоты  $U_{\sim}$ . Вольт-вольтовые характеристики позволяют определить величину амплитуды напряжения высокой частоты, необходимой для возникновения отдельных видов разряда на смешанном напряжении при различных значениях постоянного напряжения, и, наоборот, узнать  $U_{=}$  при определенной величине  $U_{\sim}$ .

Вольт-вольтовые характеристики разряда были получены нами для всех описанных острий и при фиксированных частотах напряжения высокой частоты, равных 1,25; 2,50; 5,0; 10,0; 20 и 40 МГц.

На рис. 12—17 представлены систематизирующие характеристики разряда. Систематизирующая характеристика разряда — это вольт-вольтовая характеристика, на которой показаны еще фотографии наблюдающихся форм разряда при разных значениях  $U_{=}$  и  $U_{\sim}$  а также их осциллограммы.

Перейдем к последовательному рассмотрению систематизирующих характеристик разряда, приведенных на рис. 12—17.

На рис. 12 представлена систематизирующая характеристика для  $\nu = 1,25 \text{ MHz}$ .

Выше мы отметили, что после определения пороговых напряжений различных импульсов короны на постоянном напряжении приложенное к разрядному промежутку напряжение было уменьшено ниже порога вспышечных импульсов и на острие налагалось высокочастотное напряжение. Оказывается, что до определенной величины постоянного напряжения, равной в случае рис. 12 примерно одному киловольту, увеличение напряжения высокой частоты всегда приводило сперва к возникновению вспышечных импульсов, аналогичных вспышечным импульсам короны постоянного напряжения. (Порог вспышечных импульсов на смешанном напряжении мы будем понимать в таком же смысле, как и в случае постоянного напряжения. На рис. 12 пороговые напряжения вспышечных импульсов обозначены сплошными кружками).

С дальнейшим увеличением либо постоянного напряжения, либо напряжения высокой частоты амплитуда и длительность вспышечных импульсов возрастали. (Области напряжений существования вспышечных импульсов заштрихованы горизонтальными линиями).

Осциллограммы вспышечных импульсов на рис. 12 засняты непосредственно перед порогом других форм разряда с острия. На рис. 12 видно, что величина вспышечного импульса на смешанном напряжении отличается от вспышечного импульса постоянного напряжения. Около  $U_+ = 1,0 \text{ kV}$  вспышечные импульсы теряли и свой обычный вид. Их осциллограмма гладкая, без характерных «зазубрин» и величина больше, чем в случае более высоких составляющих постоянного напряжения. Свечение разряда по-прежнему сосредоточено около поверхности острия, но оно более яркое, чем в случае «обычных» вспышечных импульсов. Если  $U_+ < 1 \text{ kV}$ , вспышечные импульсы не наблюдаются при любых значениях  $U_-$ . Увеличение  $U_-$  здесь сразу привело к возникновению высокочастотного разряда.

Увеличение  $U_-$  или  $U_+$  выше порога вспышечных импульсов приводит в определенном интервале изменений  $U_-$  и  $U_+$  к возникновению формы разряда, подобной стримеру положительной короны постоянного напряжения. На рис. 12 под фотографиями стримеров указаны величины  $U_+$  в киловольтах, при которых они были сфотографированы. Величину высокочастотного напряжения можно определить по вольт-вольтовой характеристике — она всегда была выше на  $100 \text{ V}$  относительно амплитуды возникновения стримеров  $U_-$  при указанных значениях  $U_+$ . (Длительность экспозиции  $10 \text{ min}$ ).

На рис. 12 показаны также осциллограммы стримеров. Стрелки около осциллограмм указывают на величину  $U_+$  и  $U_-$ , при которых они были получены.

(Перенапряжение относительно порога  $100 \text{ V}$ . Осциллограммы вспышечных импульсов по сравнению с осциллограммами стримеров представлены в трехкратном усилении).

При увеличении  $U_+ + U_-$  выше порога стримеров по постоянной, либо по высокочастотной составляющей смешанного напряжения число стримеров в единицу времени сперва возрастало до некоторого максимума, а затем с дальнейшим увеличением приложенного напряжения убывало до нуля. (Последнее зависит от соотношения между  $U_+$  и  $U_-$ ). Границы области напряжений возникновения стримеров положительной короны обозначены крестиками, сама область возникновения стримеров имеет серый цвет.

При более высоких значениях  $U_+ + U_-$  и в определенных интервалах изменений  $U_+$  и  $U_-$  разряд на смешанном напряжении наблюдался в виде непрерывной вспышечной короны, по внешнему виду не отличающейся от вспышечной короны постоянного напряжения. На систематизирующей характеристике области напряжений существования непрерывной вспышечной короны покрыты точками.

На рис. 12 видно также пересечение областей существования стримеров и непрерывной вспышечной короны. Это означает, что на фоне непрерывной вспышечной короны единичные стримеры все же возникают (см. осциллограмму с координатами  $U_- = 3,5$ ,  $U_+ = 8,5$ ).

Рис. 12 свидетельствует, что стримеры положительной короны на смешанном напряжении возникают лишь до определенного значения  $U_-$ . При более высоких ее значениях, начиная примерно с  $U_- = 5 \text{ kV}$ , при тех величинах смешанного напряжения, при которых мы ожидали возникновения стримеров, наблюдался вид разряда в установившейся форме заметно не отличающейся от разряда на высокой частоте.

В наших опытах развитие высокочастотного разряда в свою устойчивую форму было, однако, искусственно предотвращено подходящим выбором величины связи между острием и колебательным контуром генератора высокой частоты, приводящим после возникновения разряда, ввиду изменения параметров антенны-острия, к отстройке последнего от генератора напряжения высокой частоты. Высокочастотный разряд, таким образом, можно было заставить возникать в виде отдельных импульсов или вспышек разряда. Искусственное прекращение развития высокочастотного разряда было необходимо для наблюдений за его начальными стадиями, а также для предотвращения расплавления острий, что могло очень легко случиться, особенно на более высоких частотах.

Границы области напряжений возникновения высокочастотных вспышек на вольт-вольтовых характеристиках обозначены окружностями. Область возникновения высокочастотных вспышек залита сплошь.

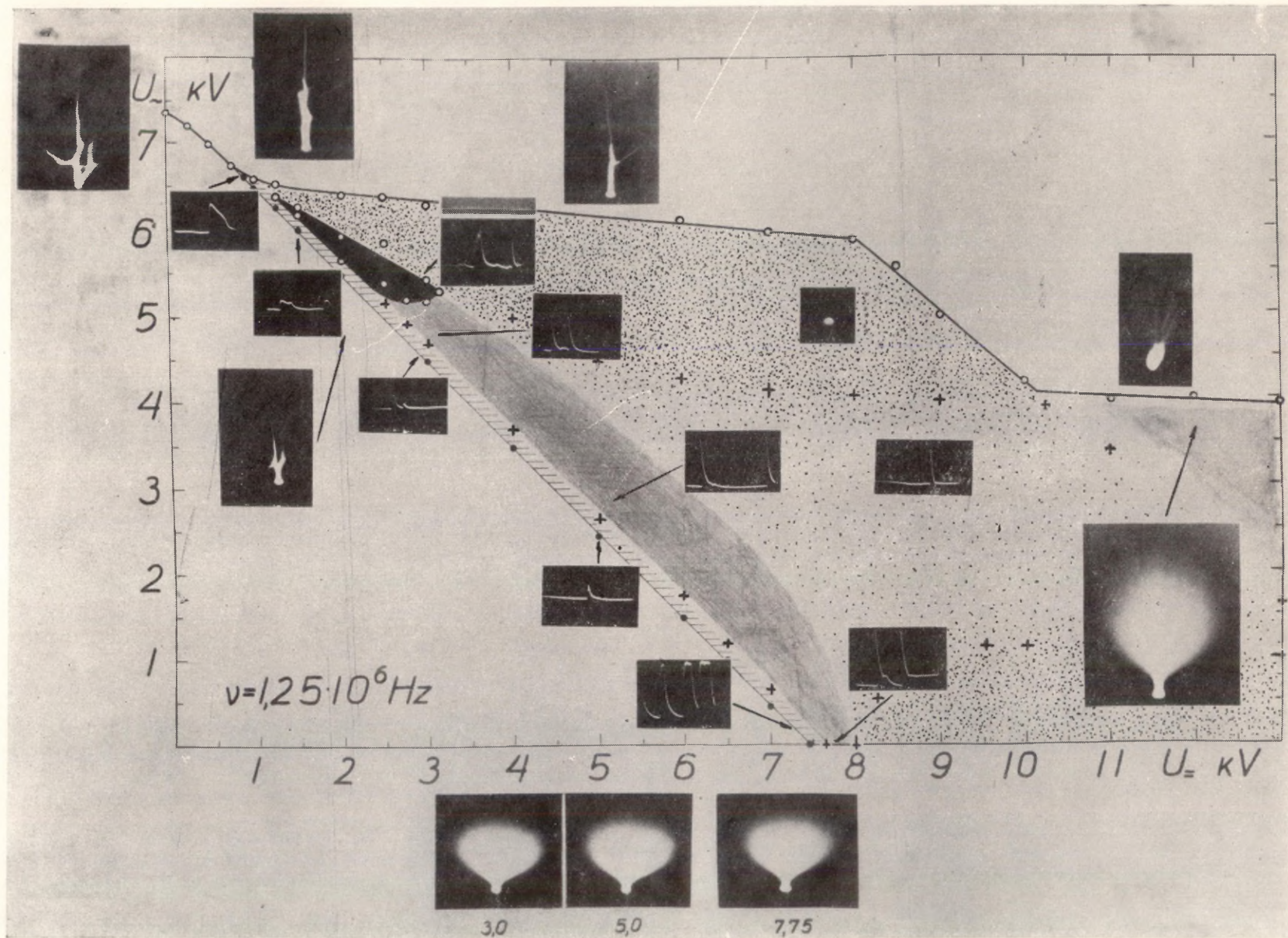


Рис. 12. Систематизирующая характеристика разряда. Разрядный промежуток 1, острие 2.  $\nu = 1,25 \text{ MHz}$ . ● — порог вспыхивающих импульсов; горизонтальными линиями заштрихованы области напряжений возникновения вспыхивающих импульсов. + — границы области напряжений возникновения стримеров положительной короны; серый цвет — области напряжений возникновения стримеров. ○ — границы областей напряжений возникновения высокочастотных вспыхивающих импульсов; область напряжений залитая сплошь — одна из областей возникновения высокочастотных вспыхивающих импульсов — область BCC'D по рис. 21. Точками покрыта область существования непрерывной вспыхивающей короны.

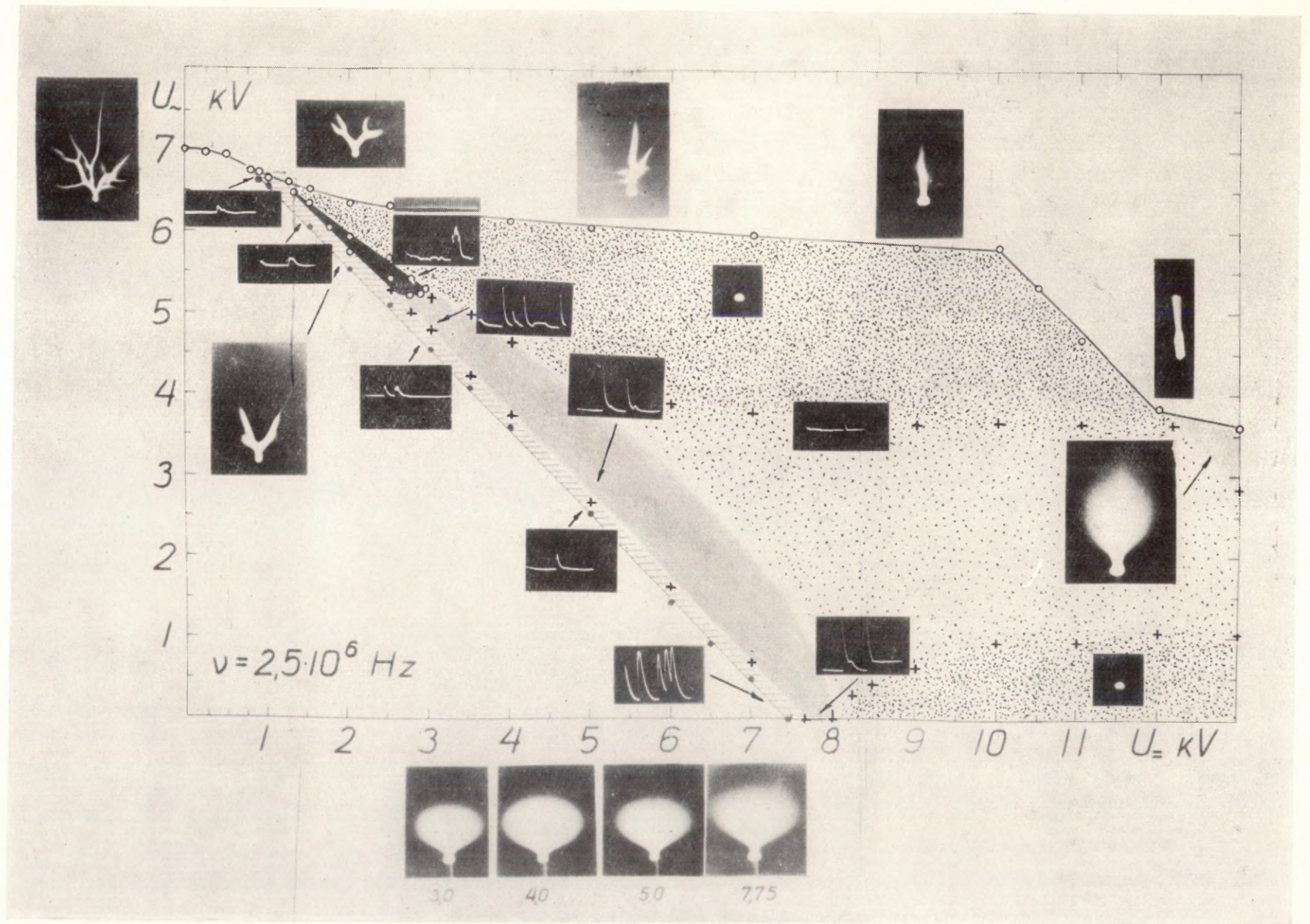


Рис. 13. Систематизирующая характеристика разряда.  $\nu = 2,5 \text{ MHz}$ .

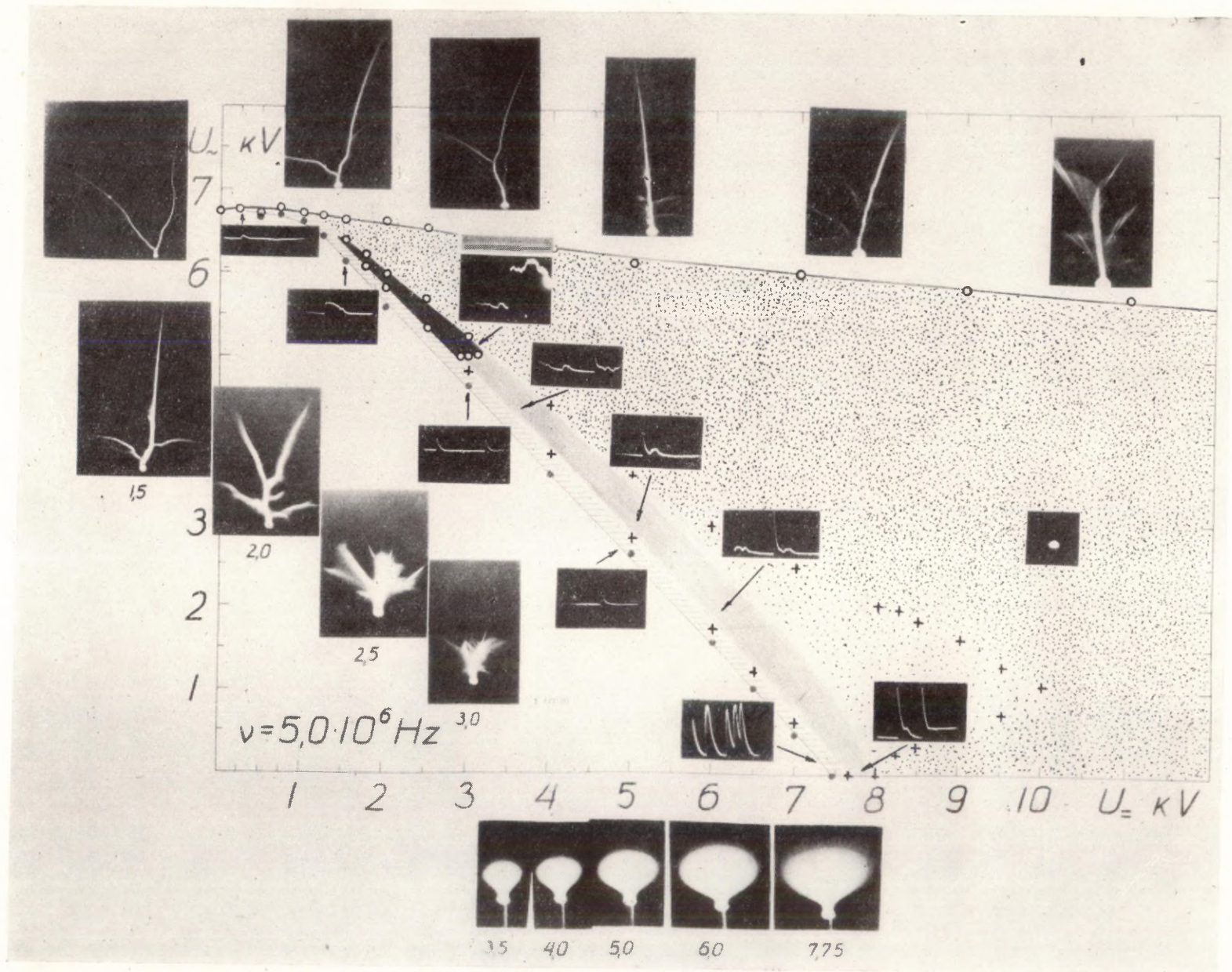


Рис. 14. Систематизирующая характеристика разряда.  $\nu = 5,0 \text{ MHz}$ .

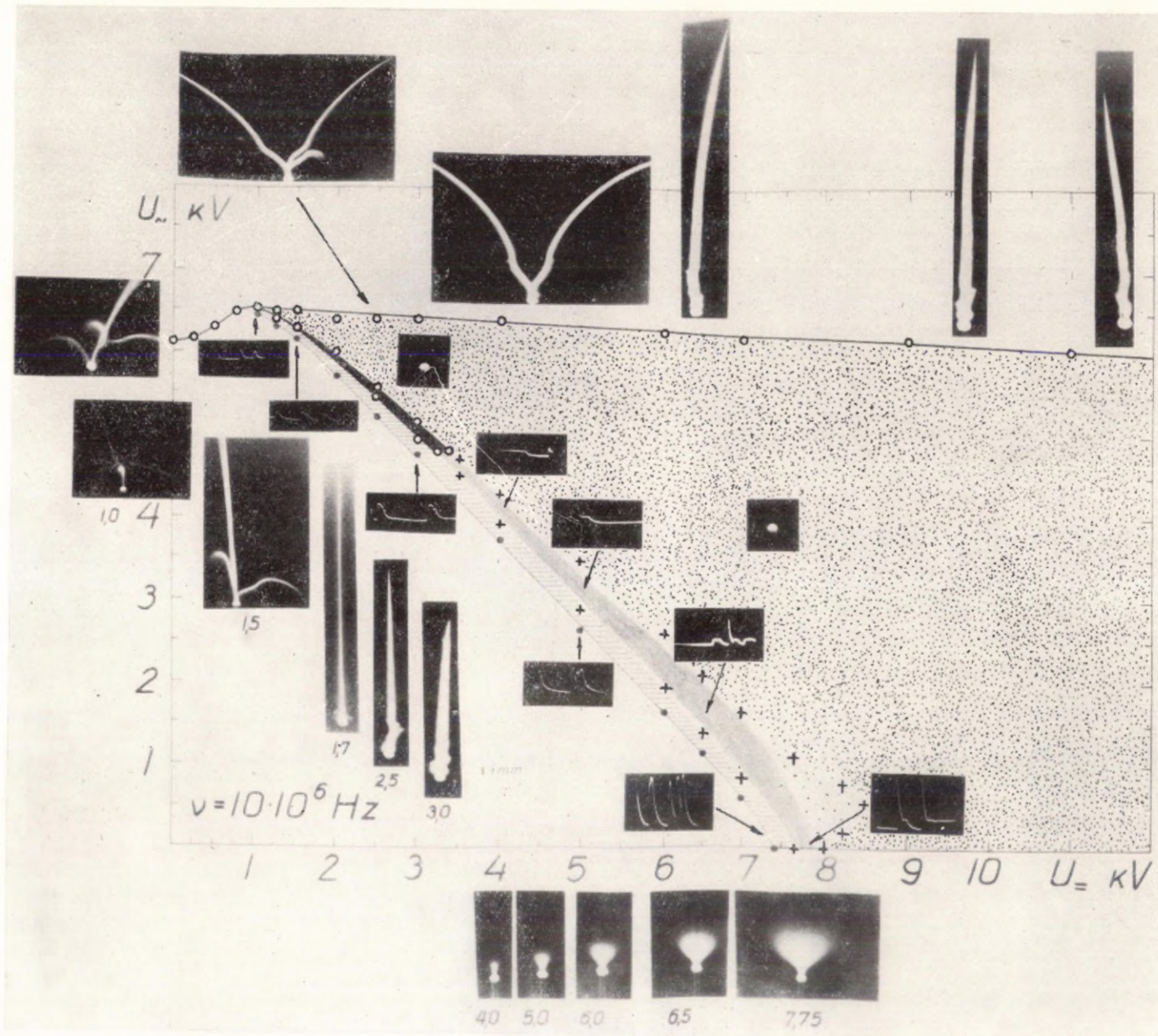


Рис. 15. Систематизирующая характеристика разряда.  $\nu = 10,0 \text{ MHz}$ .

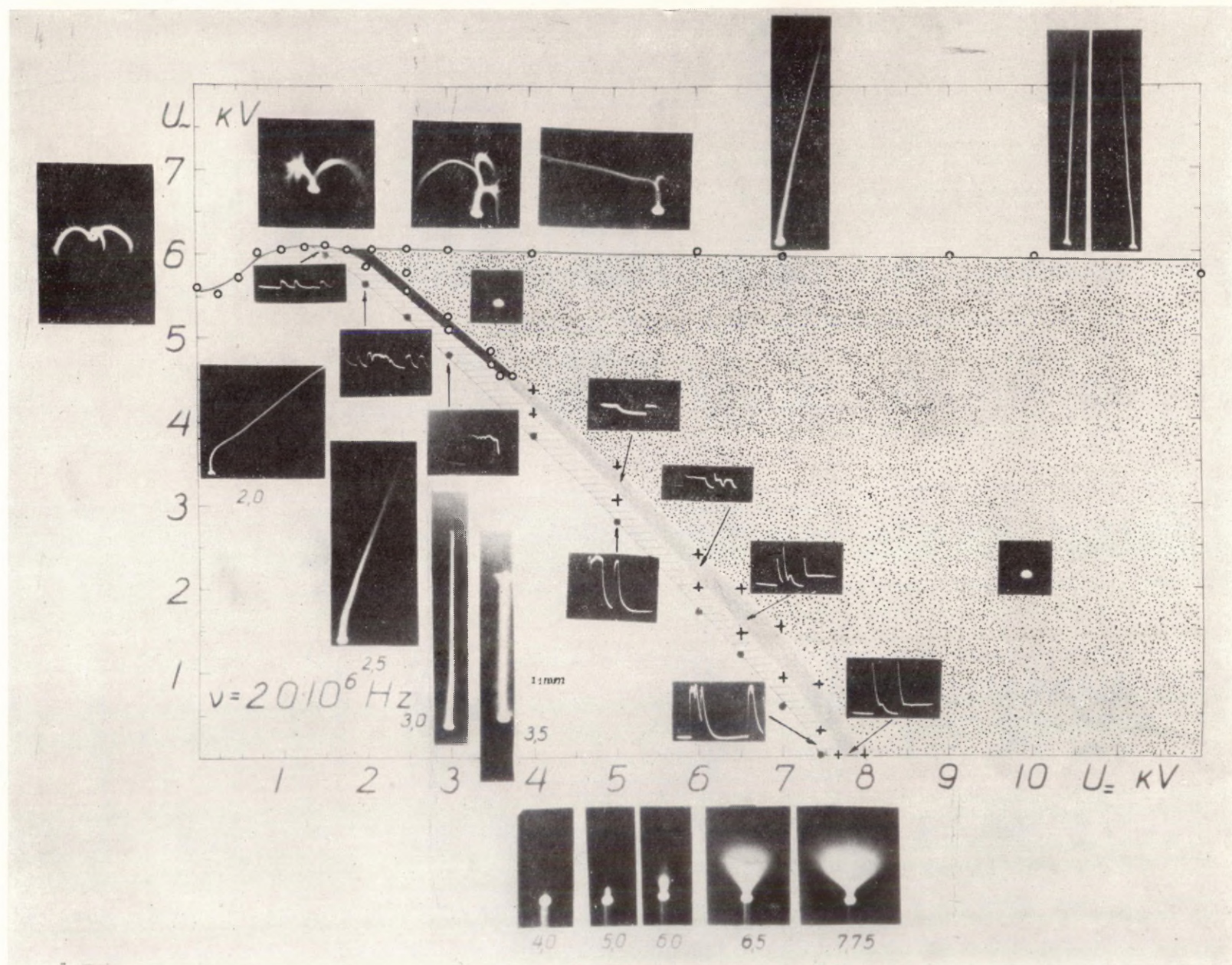


Рис. 16. Систематизирующая характеристика разряда,  $\nu = 20 \text{ MHz}$ .

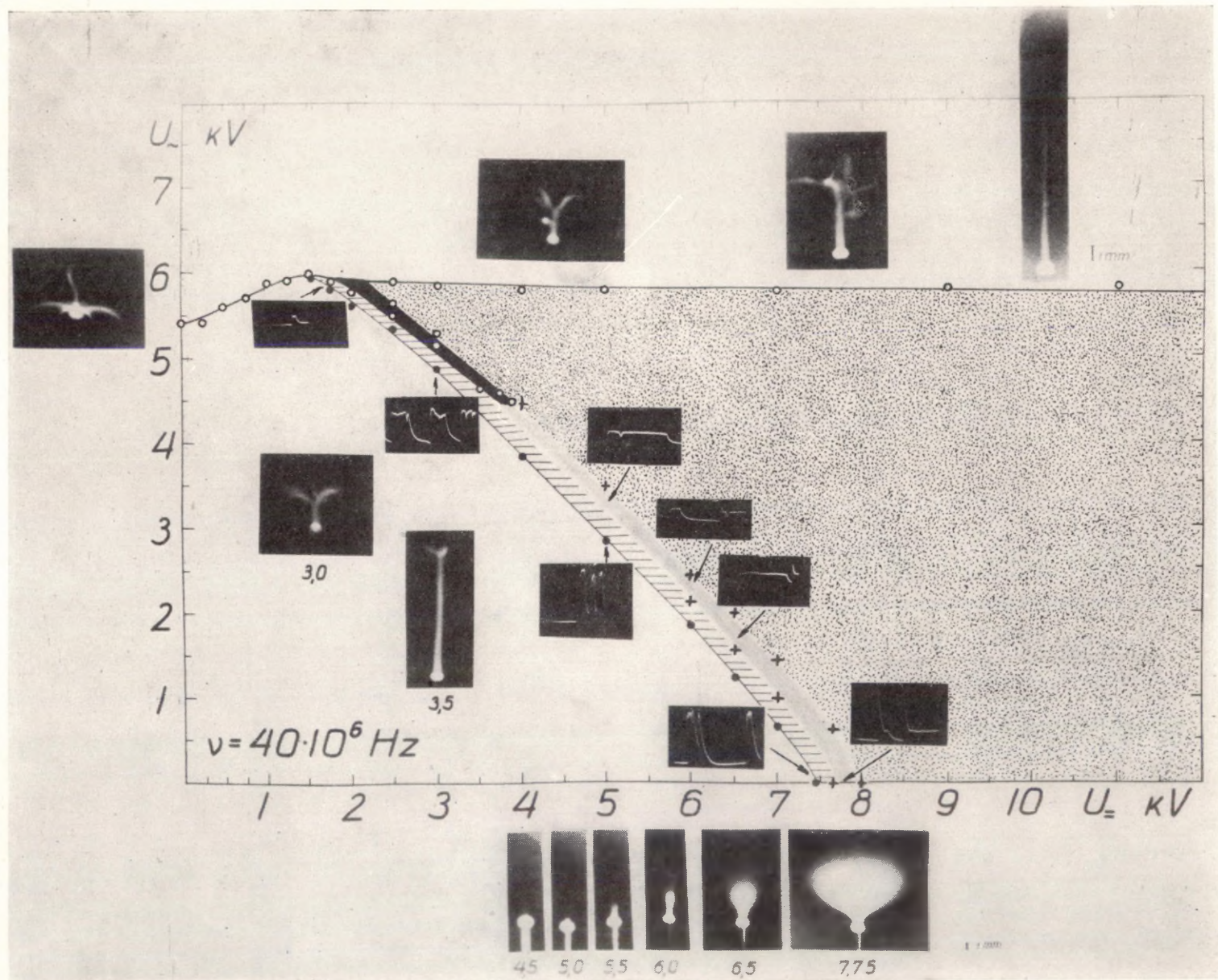


Рис. 17. Систематизирующая характеристика разряда.  $\nu = 40 \text{ MHz}$ .

На осциллограмме, снятой около границы возникновения высокочастотных вспышек (рис. 12), видны как вспышечный импульс, так и стример и высокочастотная вспышка. На масштабе времени каждому делению соответствует  $10^{-3}$  sec.

При более высоких значениях  $U_{\pm} + U_{\sim}$  в некотором интервале изменений смешанного напряжения наблюдалась опять непрерывная вспышечная корона (рис. 12 и 21). Границу, соответствующую напряжению прекращения высокочастотных вспышек (она же соответствует порогу непрерывной вспышечной короны), можно было определить быстрым увеличением напряжения высокой частоты и следующим за этим постепенным понижением  $U_{\sim}$  (либо  $U_{\pm}$ ) до возникновения вспышки. Пересечение области возникновения высокочастотных вспышек без образования вспышки было возможно из-за статистического характера возникновения высокочастотного разряда при этих значениях  $U_{\pm}$  и  $U_{\sim}$ .

При еще более низких значениях постоянной составляющей смешанного напряжения вспышечные импульсы, как видно на рис. 12, переходят в непрерывную вспышечную корону без промежуточного возникновения высокочастотных вспышек или стримеров положительной короны. Образовавшийся «проход» между двумя областями возникновения высокочастотных вспышек использовался также иногда для определения напряжения прекращения высокочастотных вспышек. (Понятие «напряжение прекращения высокочастотных вспышек» не следует отождествлять с понятием «напряжение потухания или гашения разряда», являющимся минимальной величиной напряжения существования высокочастотного разряда в определенных конкретных условиях. Величину напряжения потухания высокочастотного разряда мы не измеряли).

За область возникновения высокочастотных вспышек можно было попасть и «снизу», со стороны более высоких значений  $U_{\pm}$ . На это наше внимание обратил О. Кабардин.

Из рис. 12 видно, что выше областей возникновения высокочастотных вспышек и стримеров положительной короны существует непрерывная вспышечная корона. Дальнейшее увеличение напряжения привело к новому появлению высокочастотных вспышек — «верхняя граница» возникновения высокочастотных вспышек. При напряжениях выше «верхней границы» наблюдались только высокочастотные вспышки.

Фотографии высокочастотных вспышек, показанные на рис. 12—17, были получены открытым объективом (время экспозиции, следовательно, определялось длительностью вспышки). Цифры у некоторых снимков на рис. 12—17 соответствуют величине постоянного напряжения в киловольтах, при которых были сфотографированы высокочастотные вспышки. Величина  $U_{\sim}$  при этом соответствует порогу высокочастотных вспышек при указанной величине постоянного напряжения. Расположение фотографий высокочастотных вспышек над «верхней границей» соответствует примерно тем величинам

$U_{\pm}$ , при которых они были получены. Величины  $U_{\sim}$  при этом равны «граничным значениям» высокочастотного напряжения. Самые левые фотографии на рис. 12—17 относятся к высокочастотным вспышкам при  $U_{\pm} = 0$ .

Рис. 12 показывает, что значительные перенапряжения по постоянной составляющей  $U_{\pm} + U_{\sim}$  приводят к новому увеличению числа стримеров в единицу времени. Как видно из фотографий, больше стала и длина стримеров. Эти стримеры около границы возникновения высокочастотных вспышек часто заканчивались пробоем разрядного промежутка. Естественно, что по терминологии Л. Лёба указанные стримеры являются предпробойными стримерами. При появлении предпробойных стримеров амплитуда напряжения высокой частоты  $U_{\sim}$ , необходимая для возникновения высокочастотного разряда, стала опять меньше (рис. 12).

Вышеописанная методика составления систематизирующих характеристик разряда была нами применена и в случае других частот.

На рис. 13 приведена систематизирующая характеристика при  $\nu = 2,5$  MHz. Видно, что вольт-вольтовая характеристика существенно не отличается от характеристики в случае  $\nu = 1,25$  MHz. Фотографии и осциллограммы стримеров свидетельствуют о некотором уменьшении величины стримеров при уменьшении постоянной составляющей смешанного напряжения.

Систематизирующая характеристика разряда на рис. 14 соответствует частоте  $\nu = 5,0$  MHz.

Вольт-вольтовая характеристика разряда указывает на заметное сужение областей возникновения стримеров и высокочастотных вспышек на смешанном напряжении (речь идет об области высокочастотных вспышек, залитой сплошь, — область  $VCC'D$  на рис. 21). Предпробойных стримеров нет. Величина стримеров с уменьшением  $U_{\pm}$  убывает быстрее, чем в предыдущем случае. Отдельные импульсы тока, напоминающие вспышечные импульсы положительной короны, наблюдаются при весьма незначительных значениях  $U_{\pm}$ , ( $U_{\pm} \approx 250$  V). Порог вспышечных импульсов и стримеров на смешанном напряжении выше соответствующих порогов на постоянном напряжении.

На рис. 15 представлена систематизирующая характеристика для  $\nu = 10,0$  MHz.

Рис. 15 свидетельствует о дальнейшем сужении областей возникновения стримеров и высокочастотных вспышек. Быстро убывает величина стримеров с уменьшением постоянной составляющей смешанного напряжения. Величина вспышечных импульсов больше, чем в тех же условиях на более низких частотах. Имеет место и дальнейшее повышение порога вспышечных импульсов, стримеров и следующих за стримерами высокочастотных вспышек. Форма высокочастотных вспышек сильно зависит от  $U_{\pm}$  и  $U_{\sim}$ .

Систематизирующие характеристики разряда на рис. 16 и 17 приведены для частот 20 и 40 MHz соответственно.

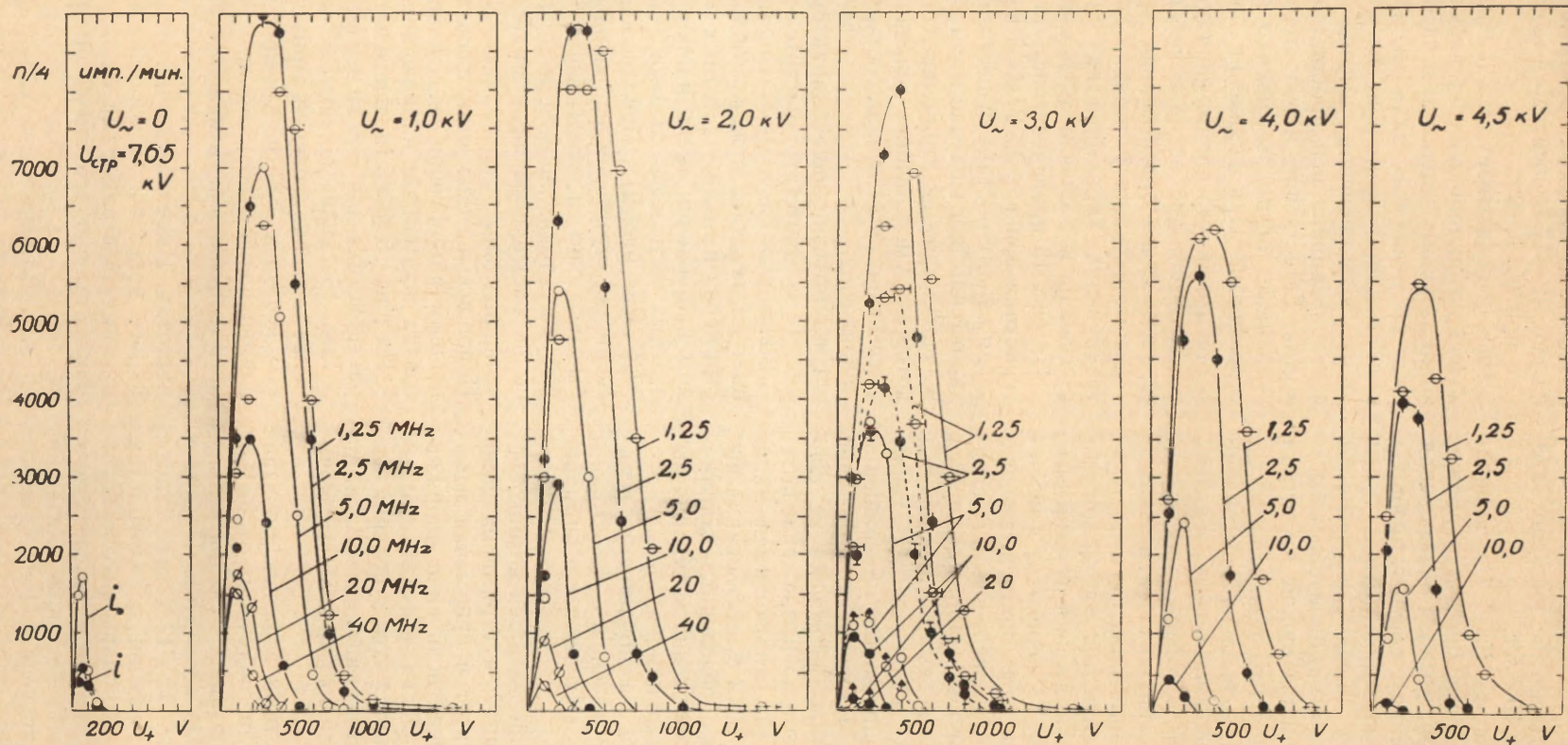


Рис. 18. Счетные характеристики стримеров. Разрядный промежуток 1, острие 2. По оси ординат отложена величина числа стримеров в единицу времени, по оси абсцисс — величина перенапряжения  $U_+$  по постоянному напряжению относительно порога стримеров на смешанном напряжении. Пунктирные кривые соответствуют начальной ионизации в три раза большей, чем сплошные кривые.

Наблюдается еще большее сужение областей возникновения стримеров. Пороговые напряжения вспышечных импульсов, стримеров и высокочастотных вспышек («сплошь залитая область») выше, чем в случае любых других исследованных частот. По величине вспышечные импульсы на смешанном напряжении отличаются незначительно от вспышечных импульсов постоянного напряжения.

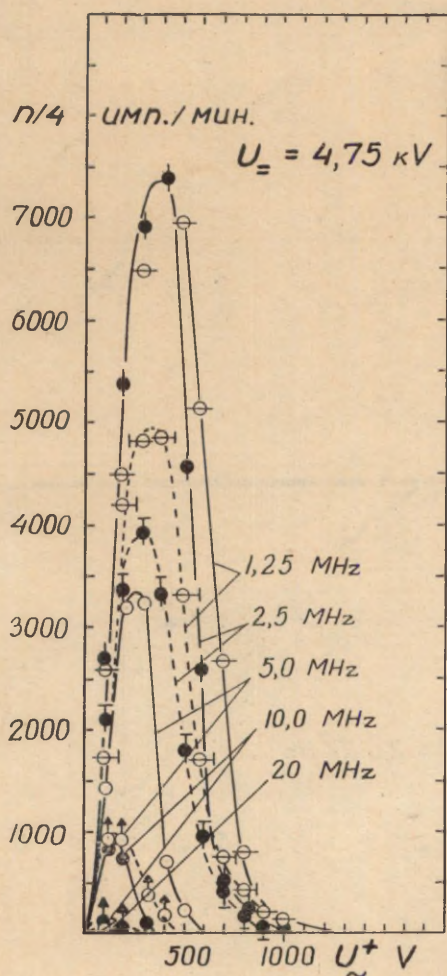


Рис. 19. Счетные характеристики стримеров. Разрядный промежуток 1, острие 2. По оси абсцисс отложена величина перенапряжения  $U_+$  по высокочастотной составляющей смешанного напряжения. В остальных обозначения такие же как и на рис. 18.

Осциллограмма стримеров с уменьшением  $U_ =$  убывала настолько быстро, что вскоре стримеры стали не различимы на фоне вспышечных импульсов.<sup>2</sup> Для определения порога стримеров в этом

<sup>2</sup> По этой причине нами первоначально было предположено, что и высокочастотные вспышки не возникают в «сплошь залитой области». О. Кабардин, исследуя смешанное напряжение со стороны высокочастотного разряда, впоследствии все же обнаружил возникновение высокочастотного разряда и в этой области. После этого нами были применены дополнительные способы для обнаруживания стримеров на смешанном напряжении.

случае необходимо было пользоваться вспомогательным электродом, позволяющим уменьшить  $RC$  на входе осциллографа (см. рис. 10), или микроскопом МБС-1. По показаниям микроскопа длина стримеров около порога возникновения высокочастотных вспышек в случае  $\nu = 40 \text{ MHz}$  была не более  $0,1 \text{ mm}$ .

В заключение этой части отметим, что для составления систематизирующих характеристик было сделано более 1000 фотографий высокочастотных вспышек. На рис. 12—17 представлены лишь наиболее характерные из них при указанных значениях  $U_ =$  и  $U_-$ .

О характере изменения числа стримеров в единицу времени при увеличении  $U_ + U_-$  выше порога их возникновения представление дают рис. 18 и 19. На рис. 18 показана зависимость числа стримеров от  $U_+$  при разных  $U_- = \text{const}$  ( $U_+$  — перенапряжение относительно порога стримеров на смешанном напряжении по постоянному напряжению). На рис. 19 приведена аналогичная зависимость от  $U_+$  при  $U_- = \text{const}$  ( $U_+$  — перенапряжение относительно порога стримеров на смешанном напряжении по высокочастотному напряжению).

#### Б. ВОЛЬТ-ВОЛЬТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРЯДА (РАЗРЯДНЫЙ ПРОМЕЖУТОК 1, ОСТРИЯ 1, 2, 3, 4, 5)

Вольт-вольтовые характеристики по описанному выше способу были нами сняты для всех использованных острий. Они представлены на рис. 20—25. Обозначения на рисунках такие же, как на рис. 12—17.

На рис. 20 приведены вольт-вольтовые характеристики разряда для острия 1.

На рис. 20 видно, что они заметно не отличаются от только что описанных вольт-вольтовых характеристик острия 2, представленных также на рис. 21. Наблюдается лишь меньшая ширина области предначальных стримеров и отсутствие предпробойных стримеров.

Прямая под углом  $45^\circ$  к осям координат соответствует порогу вспышечных импульсов короны постоянного напряжения.

Вольт-вольтовые характеристики разряда для острия 3 представлены на рис. 22.

В случае частот 1,25, 2,5 и 5,0 МГц, вольт-вольтовые характеристики острия 3 отличаются от соответствующих характеристик острий 1 и 2. Сильно расширены области возникновения высокочастотных вспышек  $BCC'D$ . При  $\nu = 1,25$  и 2,5 МГц область  $BCC'D$  вообще не образуется.

На рис. 23 показаны вольт-вольтовые характеристики острия 4. Видно, что область возникновения высокочастотных вспышек  $BCC'D$  образовалась лишь в случае наивысшей частоты, т. е. при  $\nu = 40 \text{ MHz}$ .

Вольт-вольтовые характеристики разряда для острия 5 представлены на рис. 24.

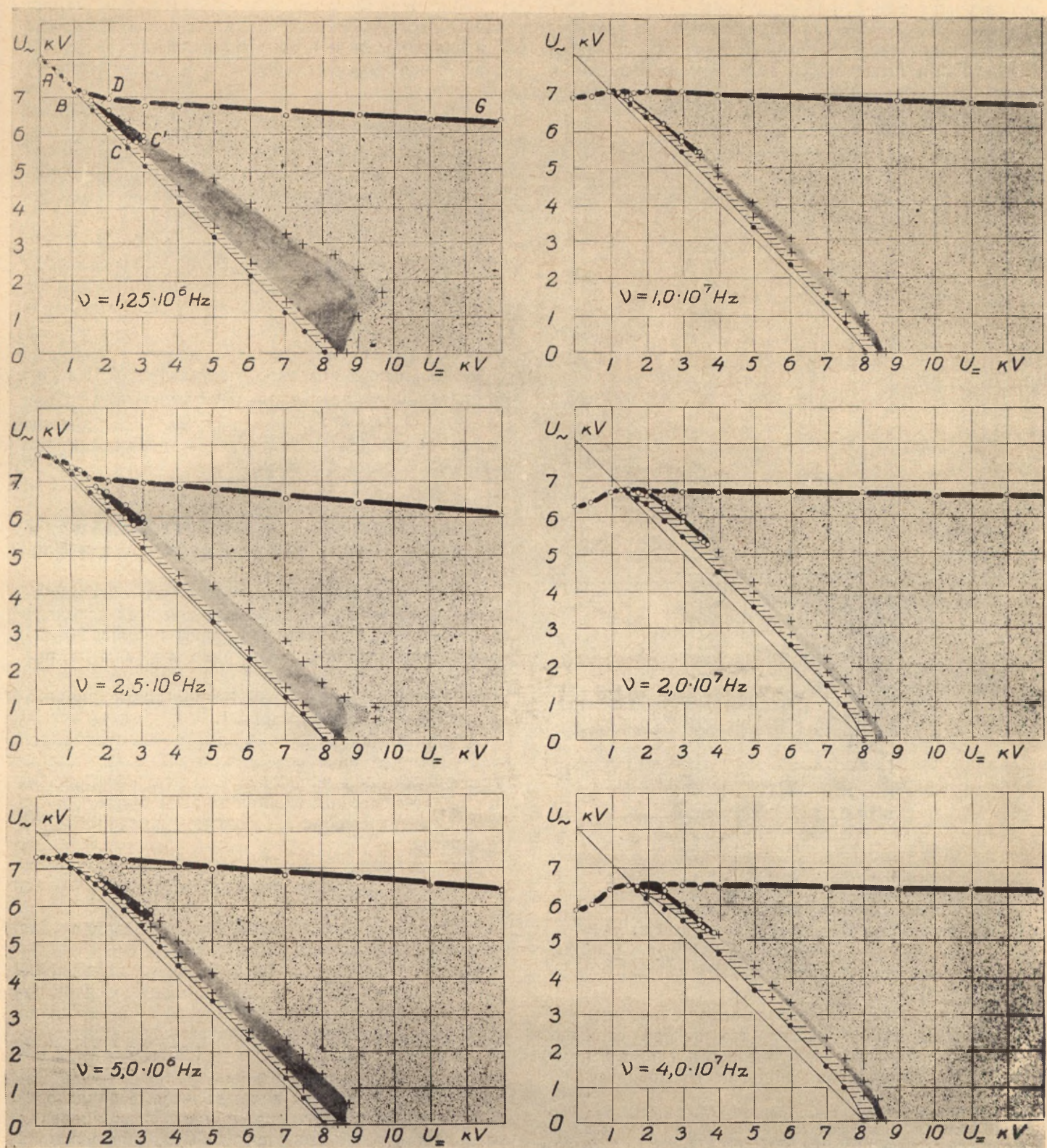


Рис. 20. Вольт-вольтные характеристики разряда. Острие 1.

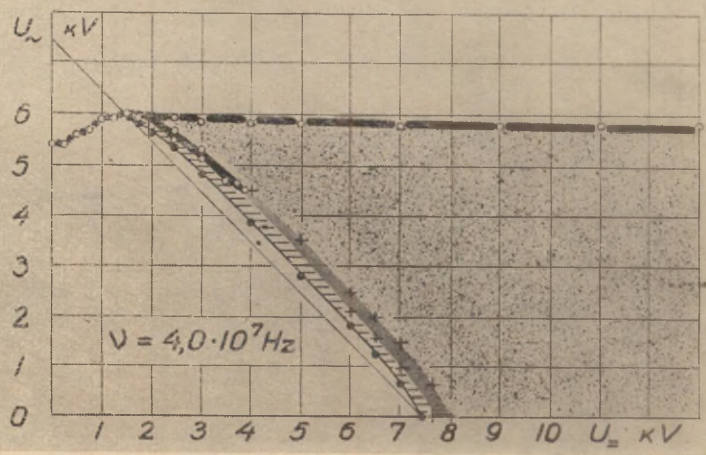
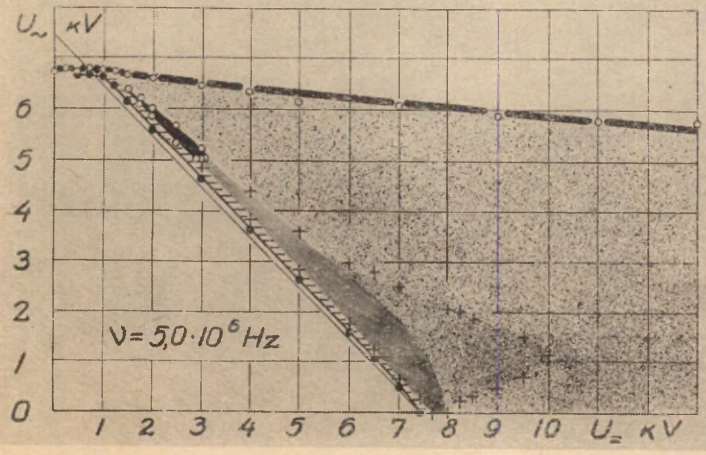
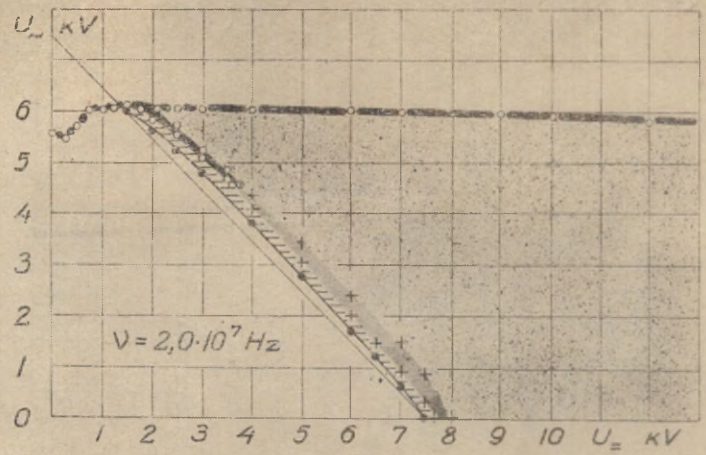
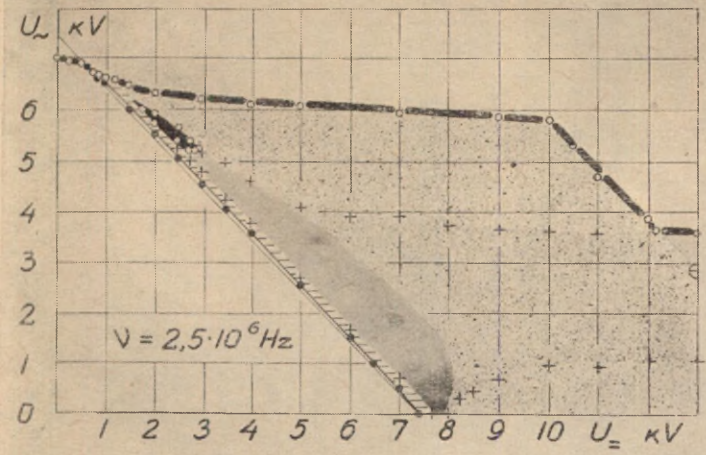
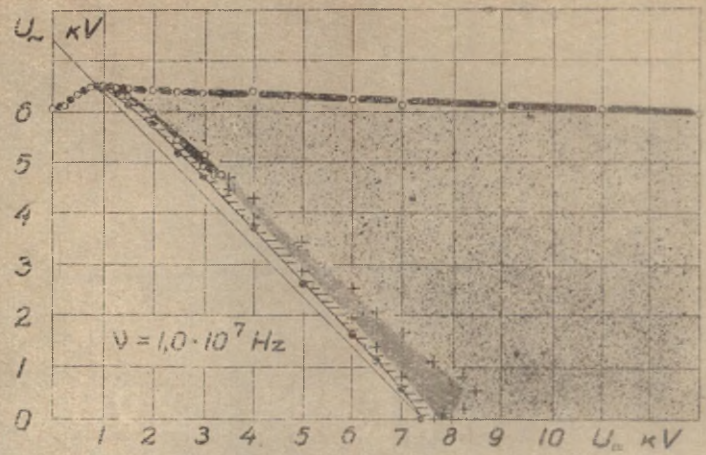
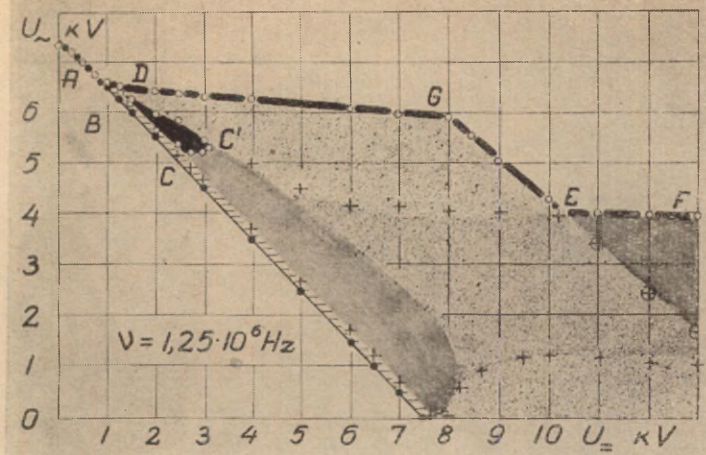


Рис. 21. Вольт-вольтные характеристики разряда. Острие 2.



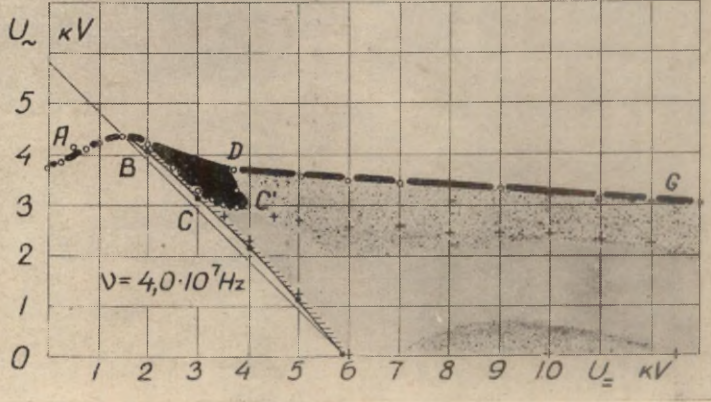
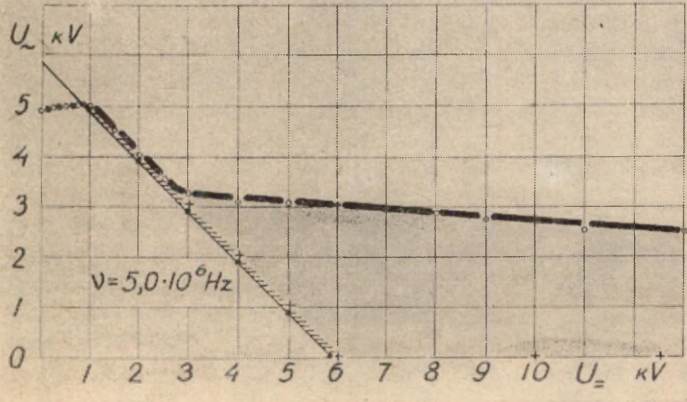
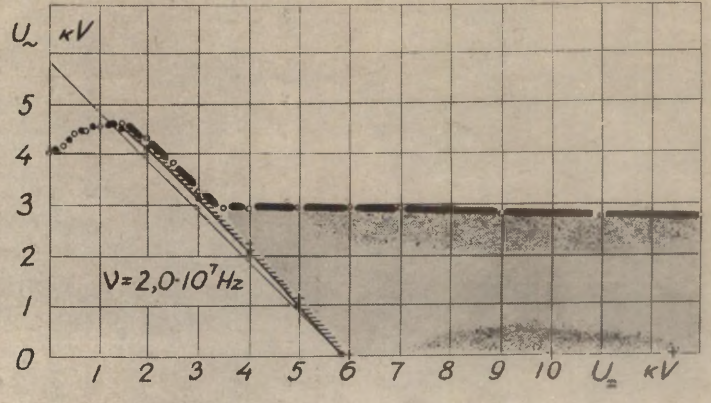
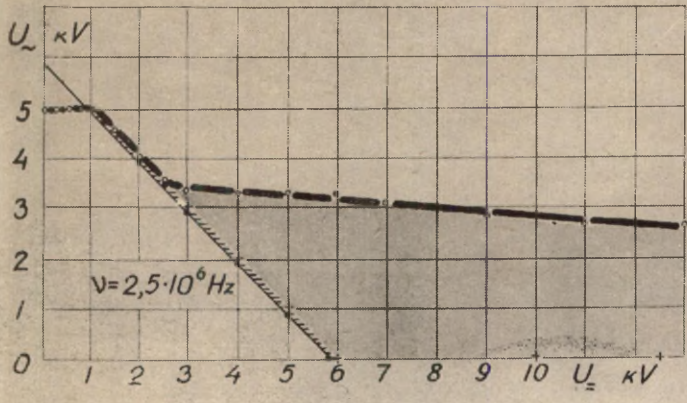
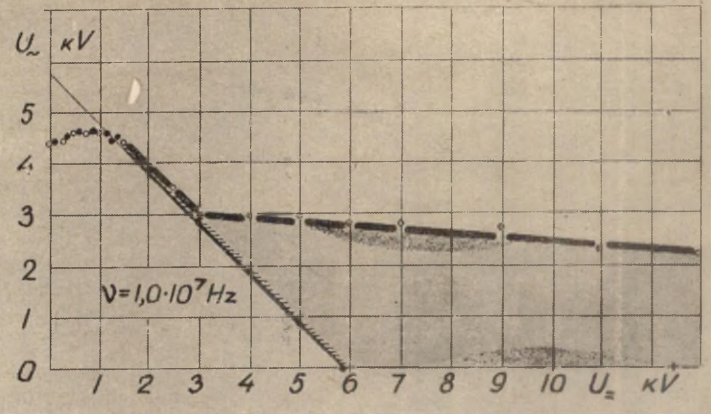
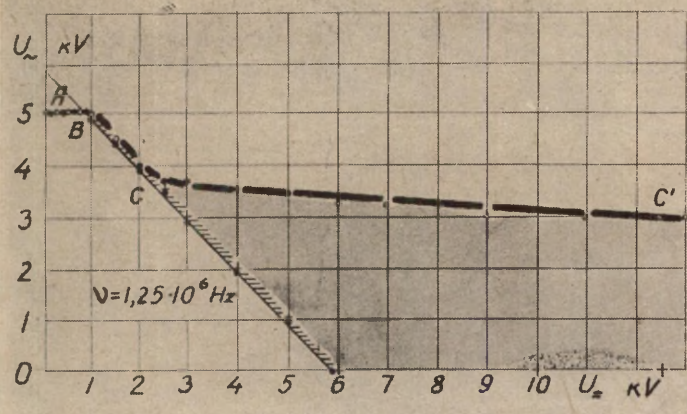


Рис. 23. Вольт-вольтные характеристики разряда. Острие 4.

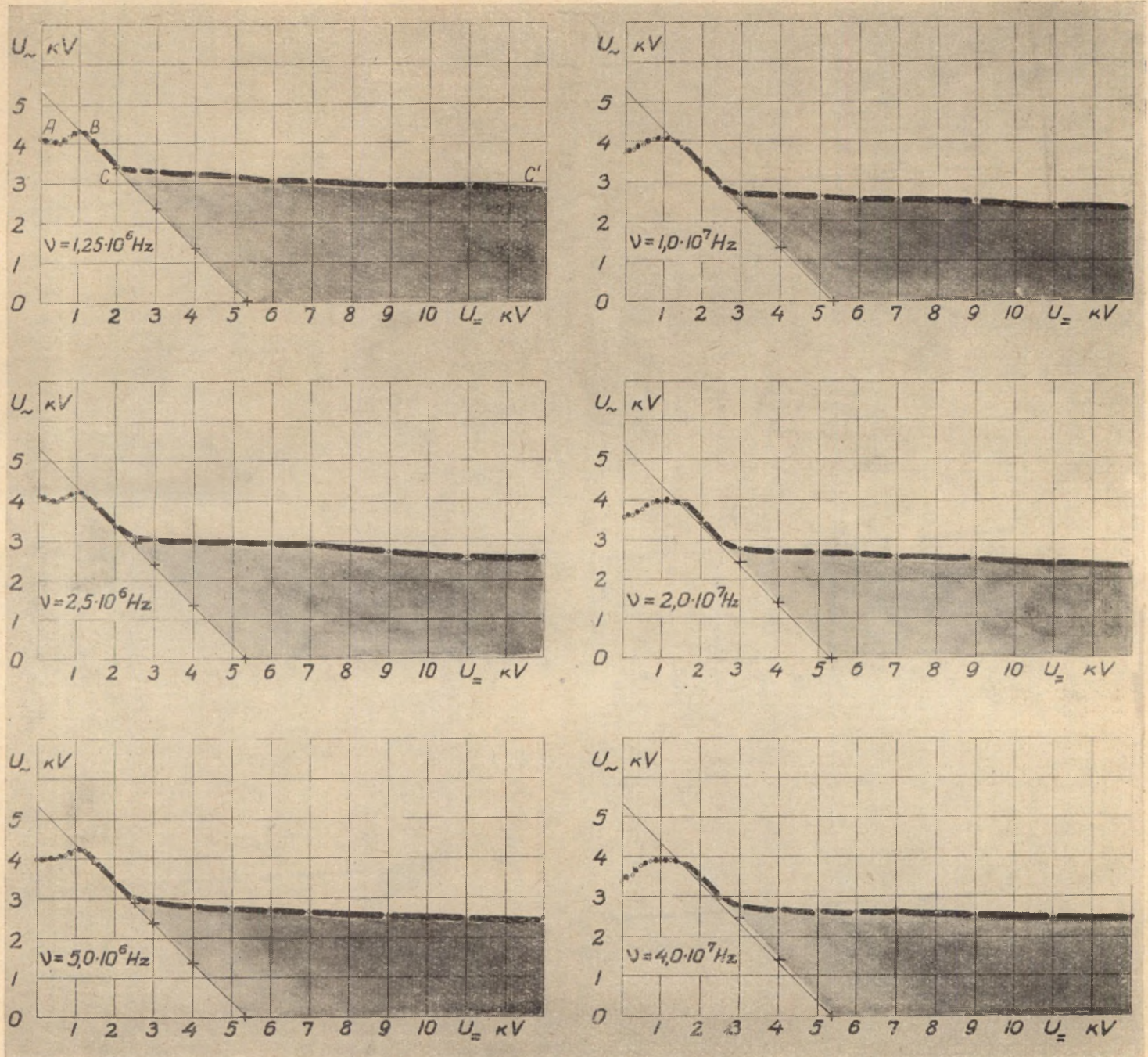


Рис. 24. Вольт-вольтные характеристики разряда. Острие 5.

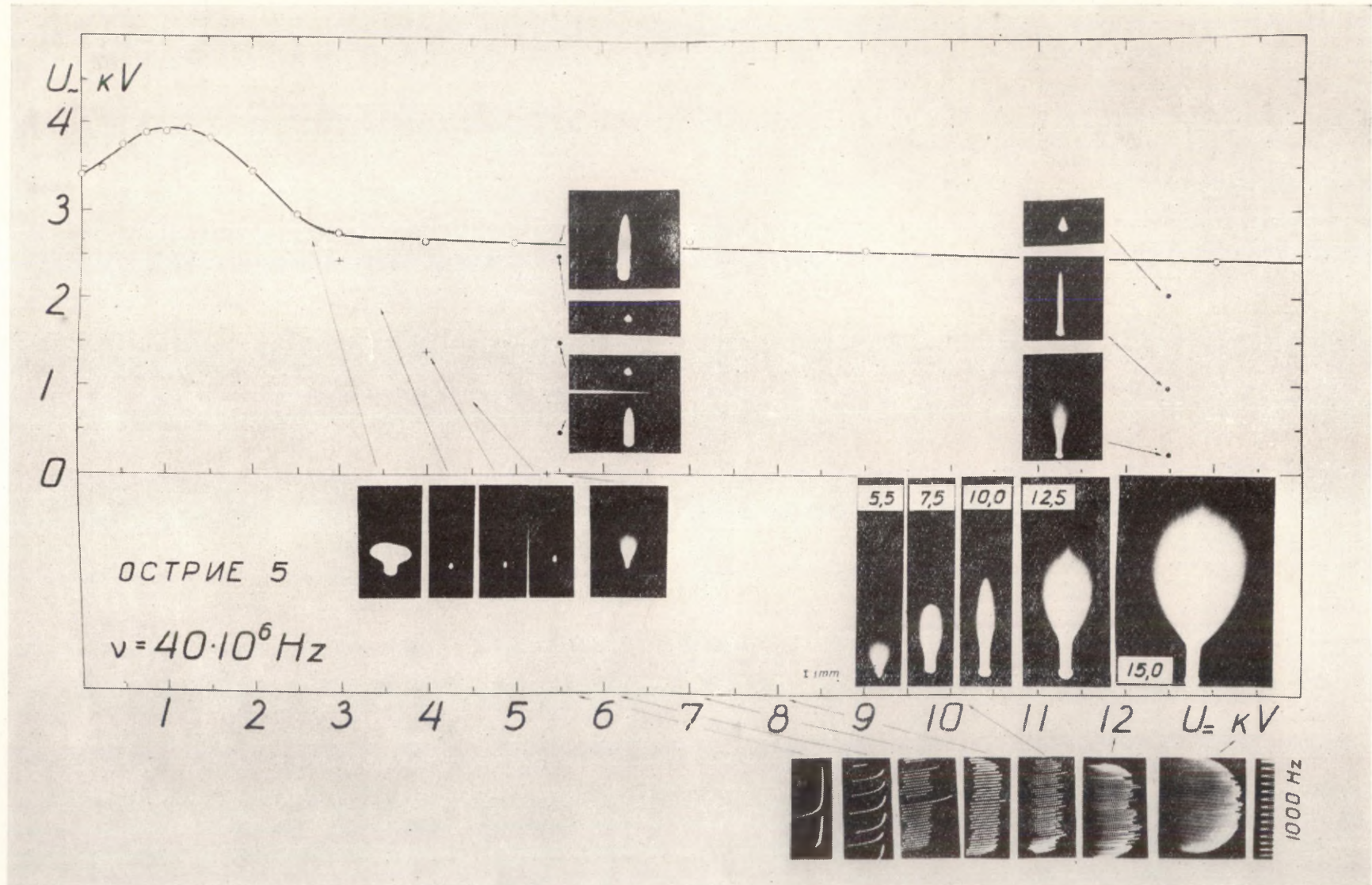


Рис. 25. Систематизирующая характеристика разряда. Разрядный промежуток 1, острие 5.  $\nu = 40 \text{ MHz}$ . Видно, что с увеличением  $U_{\text{н}}$  увеличивается как величина стримеров, так и их число в единицу времени. На смешанном напряжении величина стримеров быстро убывает с увеличением  $U_{\text{н}}$ .

Вспышечные импульсы не наблюдались ни в случае постоянного, ни в случае переменного напряжений. Увеличение перенапряжения лишь увеличивало величину стримера и их числа в единицу времени. (Аналогичный результат был получен О. Кабардиным с острием, «вершина которого представляла собой простой поперечный срез с острыми неровными краями». На самом деле описанное острие следовало бы относить к острию типа 4, так как по более поздним наблюдениям стримеры около 12—14 *kV* прекратились и в этом случае. О. Кабардиным этот факт был пропущен, очевидно, из-за источника постоянного напряжения, не позволяющего получить  $U_{\pm} > 10$  *kV*).

На рис. 24 прямая под углом  $45^\circ$  относится к порогу стримеров постоянного напряжения. Область возникновения высокочастотных вспышек *BCC'D* не образовалась ни на одной частоте.

Систематизирующая характеристика разряда для острия 5 и  $\nu = 40$  *MHz* приведена на рис. 25.

Экспериментальные результаты, изложенные в разделах А и Б, были получены в таком случае, когда от основания острия на расстоянии 20 *cm* находился  $\rho$ -активный источник интенсивностью, эквивалентной 0,0335 *mg* радия.

Опыты проводились в течение 1,5 года. Изо дня в день пороговые напряжения импульсов положительной короны и высокочастотного разряда на участке *BC* подвергались небольшим изменениям. Средние отклонения от представленных на рис. 12—17 и рис. 20—25 значений порогов не превышали  $\pm 100$  *V*. Порог высокочастотных вспышек на участке *AB* был менее определенным ( $\pm 200$  *V*). Со временем больше всего колебалось число стримеров в единицу времени, а также вероятность возникновения высокочастотных вспышек на участке *BCC'D*.

#### В. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Из вышеприведенных экспериментальных фактов следует, что при одновременном наложении на острие постоянного напряжения и напряжения высокой частоты разряд, как это и следовало ожидать, может иметь как высокочастотный характер, так и возникать в виде импульсов положительной короны. Все зависит от соотношения между  $U_{\pm}$  и  $U_{\pm}$ . В зависимости от последнего могут наблюдаться как высокочастотные вспышки, так и вспышечные импульсы, стримеры положительной короны, непрерывная вспышечная корона.

Естественно было также предполагать, что при переходе либо от постоянного, либо от высокочастотного напряжений на смешанное напряжение сохраняются лишь наиболее общие, наиболее характерные свойства указанных форм разряда, поскольку изменяются условия их возникновения и развития. Хорошей иллюстрацией сказанного являются фотографии и осциллограммы разряда,

представленные на рис. 12—17 и 25. Ниже обсуждаются некоторые возможные причины, обуславливающие разнообразие форм разряда на смешанном напряжении.

#### а) Зависимость ширины области возникновения стримеров от частоты, $U_{\pm}$ и $U_{\pm}$ .

Для конкретизации обсуждения рассмотрим острие 2.

На рис. 21 видно, что ширина области возникновения стримеров на смешанном напряжении либо по постоянному (т. е. при  $U_{\pm} = \text{const}$ ), либо по высокочастотному ( $U_{\pm} = \text{const}$ ) напряжению, как правило, шире области возникновения стримеров постоянного напряжения, причем эта ширина зависит как от  $\nu$ , так и от соотношения между  $U_{\pm}$  и  $U_{\pm}$ . Кроме того, из рис. 18 следует, что от  $\nu$ ,  $U_{\pm}$  и  $U_{\pm}$  зависит и число стримеров в единицу времени.

Наблюдающиеся закономерности сравнительно легко объясняются на основе представлений, известных относительно положительной короны постоянного напряжения.

В первой главе мы видели, что порог самостоятельного разряда с острия определяется возникновением вспышечных импульсов. Выше порога вспышечных импульсов появляются стримеры. Очевидно, что при напряженностях электрических полей, превышающих порог стримеров, их возникновение и развитие тем более вероятны. В случае постоянного напряжения прекращение стримеров с увеличением приложенного к разрядному промежутку напряжения обусловлено противополоем пространственного заряда положительных ионов от предыдущих импульсов. Этот пространственный заряд понижает величину суммарного электрического поля около вершины острия ниже порога стримеров, и вместо него возникает непрерывная вспышечная корона. Стримеры могут возникнуть снова лишь в том случае, когда приложенные электрические поля настолько большие, что роль дополнительных полей от пространственных зарядов в качестве мешающего фактора становится незначительной. Называются стримеры теперь уже предпробойными.

Освободиться от мешающего действия положительных ионов предыдущих импульсов разряда можно и другим путем, т. е. без относительно высоких напряжений. Для этого достаточно питать разрядный промежуток импульсным напряжением. Выбирая подходящую форму импульса, частоту их повторения или величину дополнительного постоянного поля, можно, очевидно, добиться того, что стримеры будут наблюдаться без возникновения непрерывной вспышечной короны до самого пробоя.

Питание острия одновременно постоянным напряжением и напряжением высокой частоты является тоже импульсным питанием. При  $U_{\pm} \geq U_{\pm}$  имеются

импульсы только одной полярности, при  $U_+ < U_-$  представлены также импульсы противоположного знака. Форма импульсов определяется частями синусоиды. Частота повторения импульсов соответствует частоте напряжения высокой частоты.

В случае импульсного напряжения эффективность очищения разрядного промежутка от положительных ионов в первую очередь зависит от промежутка времени, в течение которого приложенное напряжение будет ниже порога положительной короны. Следовательно, чем больше скважность между импульсами, или в нашем случае  $T$ , тем лучше условия для удаления положительных ионов из окрестности острия, тем больше при прочих равных условиях вероятность возникновения стримера в следующий полупериод напряжения высокой частоты.

Из рис. 18 и 21 следует, что наши рассуждения относительно увеличения вероятности возникновения стримеров на смешанном напряжении с уменьшением частоты находятся в хорошем качественном соответствии с опытом: чем ниже частота напряжения высокой частоты, тем больше число стримеров в единицу времени, при прочих равных условиях, и шире область их существования.

Другим фактором, определяющим быстроту очищения разрядного промежутка от положительных ионов, является величина постоянной составляющей смешанного напряжения  $U_+$ . В случае одной и той же частоты, более низким значением  $U_+$  соответствуют более короткие расстояния, проходимые ионами за неактивный промежуток времени периода напряжения высокой частоты (под неактивной частью периода мы подразумеваем промежуток времени, в течение которого приложенное напряжение будет ниже порога вспышечных импульсов). Следовательно, чем меньше  $U_+$ , тем ближе остаются положительные ионы к поверхности острия, тем больше их мешающее действие и тем меньше вероятность возникновения стримера в следующий положительный полупериод напряжения высокой частоты.

Как видно из рис. 18 и 21, наши рассуждения и в этом случае подтверждаются опытными данными: при  $U_+ + U_- = \text{const}$  более низким значениям  $U_+$  всегда соответствует меньшая вероятность возникновения стримеров.

Прекращение стримеров на смешанном напряжении с увеличением  $U_+$  можно объяснить, исходя из следующего: при увеличении перенапряжения удлиняются активные промежутки периода смешанного напряжения и вероятность возникновения стримеров должна возрастать. Одновременно увеличивается число лавин в каждом вспышечном импульсе и сокращаются неактивные промежутки периода. Последние факторы действуют в направлении уменьшения вероятности возникновения стримеров. Когда оно становится преобладающим, мы видим, что число стримеров в единицу времени с увеличением  $U_+$  убывает, т. е. уменьшается вероят-

ность их возникновения, пока вообще не становится равной нулю.

Увеличение перенапряжения по переменной составляющей смешанного напряжения  $U_-$  действует тоже двояко. При небольших перенапряжениях вероятность возникновения стримеров ввиду увеличения активных промежутков времени возрастает. Их прекращение с дальнейшим увеличением  $U_-$ , по-видимому, обусловлено пониженными значениями напряженностей электрических полей во время неактивных промежутков периода, сокращением длительности этих промежутков, а также большими величинами вспышечных импульсов в положительные полупериоды напряжения высокой частоты.

На рис. 18 и 19 видно, что число стримеров в единицу времени зависит сильно и от начальной ионизации в разрядном промежутке. Уменьшение вероятности образования стримера с увеличением концентрации отрицательных ионов обусловлено, очевидно, увеличением вероятности возникновения импульсов разряда (лавины, вспышечного импульса или стримера) на все большем числе полупериодов напряжения высокой частоты. Так как длительность неактивного промежутка времени меньше, чем время, необходимое для удаления пространственного заряда положительных ионов на достаточно большое расстояние, то он накапливается все в больших количествах около поверхности острия, препятствуя своим противопологом возникновению стримера. (По М. Амину, образование стримера становится возможным, если положительные ионы от предыдущего импульса будут удалены от поверхности острия на расстояние больше  $\frac{2}{3} L$  [32, 35]. Вычисления показывают, что расстояния, проходимые положительными ионами за полупериод напряжения высокой частоты, даже в случае  $\nu = 1,25 \text{ MHz}$ , не превышают долей миллиметра).

Число вспышечных импульсов с увеличением начальной ионизации возрастало. Как мы убедимся ниже, начиная с определенной ее величины, стримеры вообще не могут возникать, а вместо них устанавливается непрерывная вспышечная корона.

В наших обсуждениях о вероятности возникновения стримеров на смешанном напряжении не было учтено влияние формы импульсного напряжения. Ниже будет показано, что и этот фактор может играть весьма существенную роль.

б) Влияние радиуса кривизны вершины острия на области напряжений возникновения стримеров

Из рис. 20—24 следует, что форма области возникновения стримеров зависит от радиуса кривизны вершины острия. Сейчас мы попытаемся дать объяснение такой зависимости.

Уже до нас было установлено, что пороговые напряжения различных явлений короны постоянного напряжения отличаются друг от друга тем больше, чем меньше  $\frac{\rho}{L}$  [94, 38]. Этот результат

был получен остриями полусферической формы, а факт расширения, в частности, интервала напряжений возникновения стримеров обсуждению не подвергался. Недавно были опубликованы результаты работ с остриями, вершина которых имела коническую заточку [51, 26]. (По нашей терминологии указанные острия относятся к типу 4, поскольку по словам авторов, их вершины были расплавлены). Конически заточенные острия, как было замечено и нами, имели очень широкий интервал напряжений возникновения стримеров. Причина этого расширения, однако, осталась опять невыясненной.

Острия, представленные на рис. 11 и использованные в наших исследованиях, отличаются друг от друга по ряду электрических характеристик. Острия 1, 2, 3 имеют сравнительно узкую область возникновения предначальных стримеров (не более нескольких сотен вольт, см. рис. 11). В случае острия 4 она уже намного шире, причем при относительно низких значениях  $U_*$  возникают и предпробойные стримеры. У острия 5 область стримеров распространяется от порога стримеров до искрового пробоя. Кроме этого, характерной особенностью перечисленных острий является еще понижение порога тричелевских импульсов относительно порога стримеров по мере убывания радиуса кривизны вершины острия, т. е. при переходе последовательно от острия 1 к острию 5.

На рис. 26 представлены осциллограммы вспыхивающих импульсов острий 1—4, заснятые около порога стримеров. Видно, что с уменьшением  $\rho$  величина вспыхивающего импульса быстро убывает, несмотря на увеличение пороговых напряженностей электрического поля на поверхности острия [34, 37]. (Длина стримеров, в случае острий 1—5, была соответственно 12,5; 11,0; 7,5; 8,5; 8,0 *mm*). Одновременно визуальные наблюдения микроскопом МБС-1 показали, что по мере убывания  $\rho$  уменьшаются и участки поверхности острия, занимаемые свечением от вспыхивающих импульсов.

Наблюдающиеся закономерности, по всей вероятности, свидетельствуют, что вспыхивающий импульс, представляющий собой скопление лавин, образующийся из первичной лавины путем фотоионизации в газе и распространяющийся по поверхности острия, для своего развития нуждается в участках поверхности с более или менее однородным распределением напряженности электрического поля в своей окрестности. Чем меньше  $\rho$ , тем меньше величина «однородного» участка, тем меньше число лавин в каждом вспыхивающем импульсе и, следовательно, сам вспыхивающий импульс. Отсутствие «однородного» участка является причиной того, что вспыхивающий импульс вообще не может развиваться (острие 5).

Что касается стримеров, то их возникновение и развитие, в случае острий с меньшими радиусами кривизны, облегчены, очевидно, уменьшением мешающего действия положительных ионов от вспыхивающих импульсов. В том же направлении дейст-

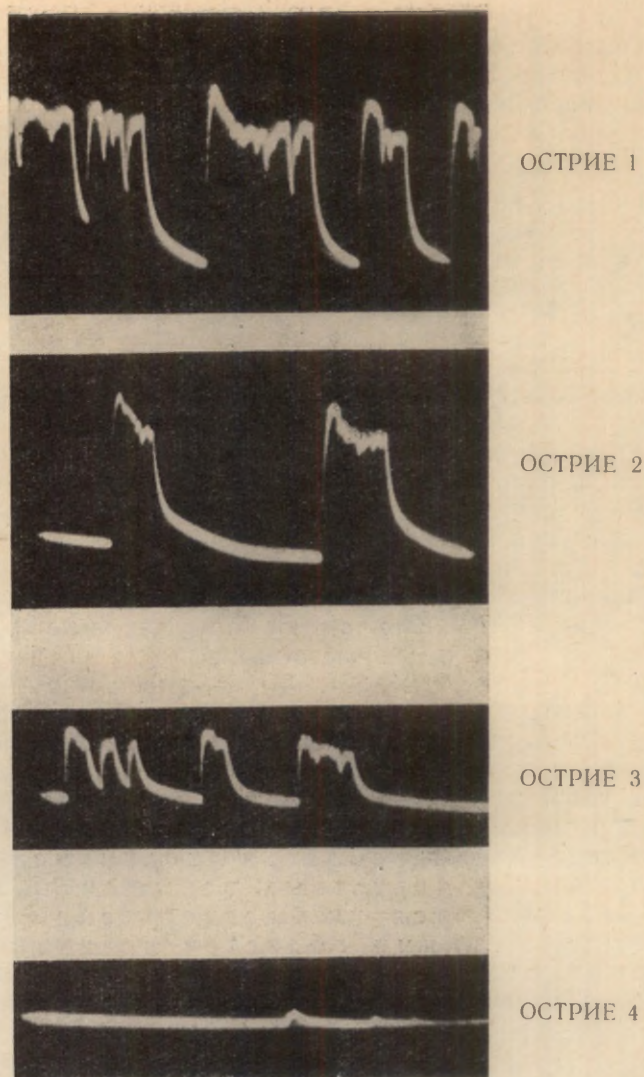


Рис. 26. Осциллограммы вспыхивающих импульсов около порога предначальных стримеров.

вует другой фактор — увеличение величины лавин в начальных стадиях короны с уменьшением  $\rho$  [34, 37]. Чем больше лавина, тем большую концентрацию положительных ионов она создает, тем больше вероятность движения последующих лавин в направлении первого и, следовательно, как мы видели выше, вероятность образования стримеров.

Таковы, по-видимому, причины уменьшения величины вспыхивающего импульса и расширения области возникновения стримеров на постоянном напряжении при уменьшении радиуса кривизны вершины острия.

В случае смешанного напряжения факт расширения области возникновения стримеров с уменьшением радиуса кривизны острия сохраняется и, как видно из рис. 20—24, выражен даже более резко, чем в случае постоянного напряжения. Применяя относительно острий 1, 3, 4, 5 рассуждения, аналогичные представленным в параграфе а. настоя-

щего раздела для острия 2 (с учетом только что изложенного), наблюдавшиеся формы областей возникновения стримеров положительной короны на смешанном напряжении будут понятны без более подробных объяснений.

в) Области напряжений возникновения стримеров и области возникновения высокочастотных вспышек  $BCC'D$

Уже поверхностное ознакомление с вольт-вольтowymi характеристиками на рис. 12—17 и рис. 20—25 свидетельствуют о существовании весьма сильной связи между областями возникновения стримеров и областями возникновения высокочастотных вспышек ниже границы  $ABG$ . Действительно, как бы ни изменилась ширина областей возникновения стримеров (при изменении  $\nu$  или  $\varrho$ , например), сразу, вслед за этим, и в том же направлении изменится и ширина области возникновения высокочастотных вспышек  $BCC'D$ . Отсутствуют стримеры ниже границы  $EF$ , нет и высокочастотных вспышек на участке  $GEF$  (рис. 20, 21, 22). То же самое относится к пороговым величинам напряжения обоих видов импульсов разряда на смешанном напряжении: повышение порога стримеров (с увеличением частоты, например) всегда сопровождается увеличением и порога высокочастотных вспышек на участке  $BC$ . Другими словами, области возникновения высокочастотных вспышек  $BCC'D$  и  $GEF$  являются как бы естественными продолжениями областей возникновения стримеров положительной короны на смешанном напряжении. Последнее означает, что при тех величинах  $U_+ + U_-$ , при которых мы ожидали возникновения стримеров, ввиду того, что  $U_-$  превышает некоторую определенную, зависящую от  $\nu$  и  $\varrho$  величину, наблюдаются высокочастотные вспышки.

При напряжениях, соответствующих областям возникновения вспышечных импульсов или существования непрерывной вспышечной короны (ниже границы  $BG$ ), эти формы разряда и наблюдаются, здесь нет высокочастотных вспышек.

Области напряжений возникновения высокочастотных вспышек «вклиниваются» в области возникновения импульсов положительной короны по областям возникновения стримеров. Единственное заключение, к которому мы приходим, исходя из вышеизложенного, следующее: высокочастотные вспышки ниже границы  $ABG$  развиваются не из отдельных лавин или вспышечных импульсов, а из стримера или недоразвившегося по сравнению с постоянным напряжением стримера положительной короны, возникшего во время одного из положительных полупериодов напряжения высокой частоты.

В дальнейшем мы свое главное внимание сосредоточим на области возникновения высокочастот-

ных вспышек  $BCC'D$  и области возникновения стримеров. Что касается других областей возникновения импульсов разряда, то они в настоящей работе обсуждению не подвергаются.

Дополнительным доказательством утверждения о возможности образования высокочастотных вспышек из стримера положительной короны служит еще следующий экспериментальный факт.

В части II мы излагали некоторые результаты опытов со счетчиком ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты. Они заключались в том, что сильной начальной ионизацией в разрядном промежутке можно было предотвратить возникновение как высокочастотных вспышек, так и стримеров положительной короны. Хотя условия возникновения высокочастотных вспышек в счетчике ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты несколько иные, чем в данном случае, все же такое действие начальной ионизации тоже указало на возможную связь между стримерами и высокочастотными вспышками.<sup>3</sup>

В условиях немодулированного высокочастотного напряжения нами совместно с О. Кабардиным было, в случае  $\nu = 10,0$   $MHz$  и разрядного промежутка острие-плоскость, замечено, что освещение плоскости ультрафиолетовым светом от ртутно-кварцевой лампы ПРК-2, расположенной примерно на расстоянии 50  $cm$  от плоскости, привело к полному прекращению возникновения стримеров на смешанном напряжении. Тогда не развивался и высокочастотный разряд на участке  $BCC'D$ .

В случае примененной в настоящей работе геометрии разрядного промежутка, нами получены следующие результаты.

Острия 1 и 2 (рис. 20, 21). Освещение плоскости ультрафиолетовым светом (рис. 27) привело к прекращению предначальных стримеров при любых значениях  $U_+ + U_-$ . Одновременно прекратилось возникновение высокочастотных вспышек в областях  $BCC'D$ . Вместо стримеров и высокочастотных вспышек, наблюдалась непрерывная вспышечная корона, порог которой соответствовал приблизительно порогу вспышечных импульсов.

Острие 3 (рис. 22). На постоянном напряжении ультрафиолетовый свет прекратил возникновение стримеров. На смешанном напряжении, начиная с частоты 5,0  $MHz$  и выше, действие ультрафиолетового света такое же, как в предыдущем случае. При  $\nu = 2,5$  и 1,25  $MHz$  освещение плоскости привело лишь к сильному сокращению числа стримеров в единицу времени и к увеличению времени запаздывания высокочастотных вспышек на участках  $BCC'D$ . Границы областей возникновения обоих видов импульсов разряда остались неизменными.

Острие 4 (рис. 23). При  $U_- = 0$  ультрафиолетовый свет прекратил возникновение предначальных

<sup>3</sup> Высокочастотное напряжение в счетчике ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты модулированное. О роли модуляции на характеристики разряда мы будем говорить ниже.

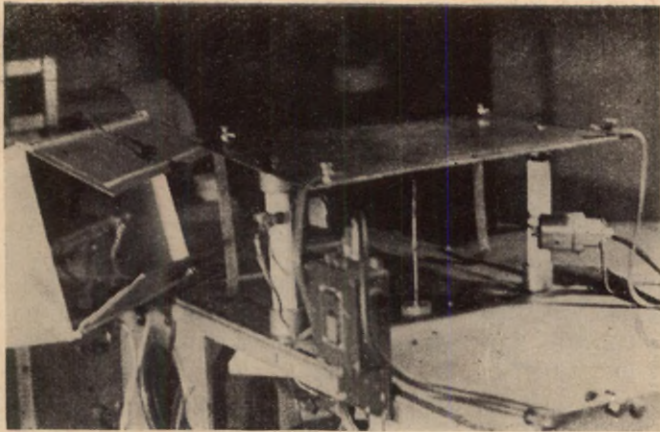


Рис. 27. Освещение плоскости ультрафиолетовым светом от лампы ПРК-2.

стримеров. В случае смешанного напряжения и  $\nu = 40$  и  $20$  МГц число стримеров в единицу времени с освещением плоскости убывало. При  $\nu < 20$  МГц и в случае небольших перенапряжений, вероятности возникновения стримеров и высокочастотных вспышек возрастали. При более высоких перенапряжениях устанавливалась в зависимости от соотношения между  $U_{\sim}$  и  $U_{-}$  непрерывная стримерная корона или высокочастотный разряд, и влияние ультрафиолетового света больше не наблюдалось.

Острие 5 (рис. 25). Около порога возникновения стримеров и высокочастотных вспышек освещение увеличивало вероятность их возникновения. При перенапряжениях 200—300 В устанавливалась непрерывная стримерная корона или высокочастотный разряд, где действие ультрафиолетового света ни в чем не проявлялось.

После всех описанных опытов, вероятно, можем считать доказанной гипотезу о возможности образования высокочастотных вспышек из стримера положительной короны. Она подтверждается, как мы убедимся ниже, также целым рядом других экспе-

риментов. Что касается формы области возникновения высокочастотных вспышек, зависимости вероятности возникновения высокочастотных вспышек от  $\nu$ ,  $U_{\sim}$ ,  $U_{-}$  и  $\rho$ , то, поскольку они развиваются из стримера, справедливы все рассуждения, приводимые нами в параграфах а. и б. относительно областей возникновения стримеров положительной короны на смешанном напряжении.

г) Повышения пороговых напряжений импульсов положительной короны на смешанном напряжении

Из рис. 20—24 видно, что пороговые напряжения вспышечных импульсов или стримеров на смешанном напряжении, начиная с некоторой частоты, зависящей от радиуса кривизны вершины острия, выше, чем порог соответствующих импульсов короны постоянного напряжения. Повышения порога стримеров относительно его порога на постоянном напряжении в случае различных частот,  $U_{\sim}$  и  $\rho$  представлены на рис. 28. Аналогичные повышения порога вспышечных импульсов легко определяются из рис. 20—24.

Графики показывают, что повышение порога импульсов положительной короны или высокочастотных вспышек на участке ВС начинают быть заметными с частоты 2,5 МГц. С увеличением частоты величина повышения возрастает. В меньшей степени заметна зависимость повышения от  $U_{\sim}$ .

Наряду с увеличением порога стримеров имеет место и убывание их величины. Об этом свидетельствуют как микроскопические, так и фотографические и осциллографические наблюдения (рис. 13—17 и рис. 25).

Наблюдающиеся повышения порога указанных видов импульсов разряда и одновременные уменьшения их величин говорят, по-видимому, о том, что длительности полупериодов напряжения высокой частоты становятся сравнимыми со временами, необхо-

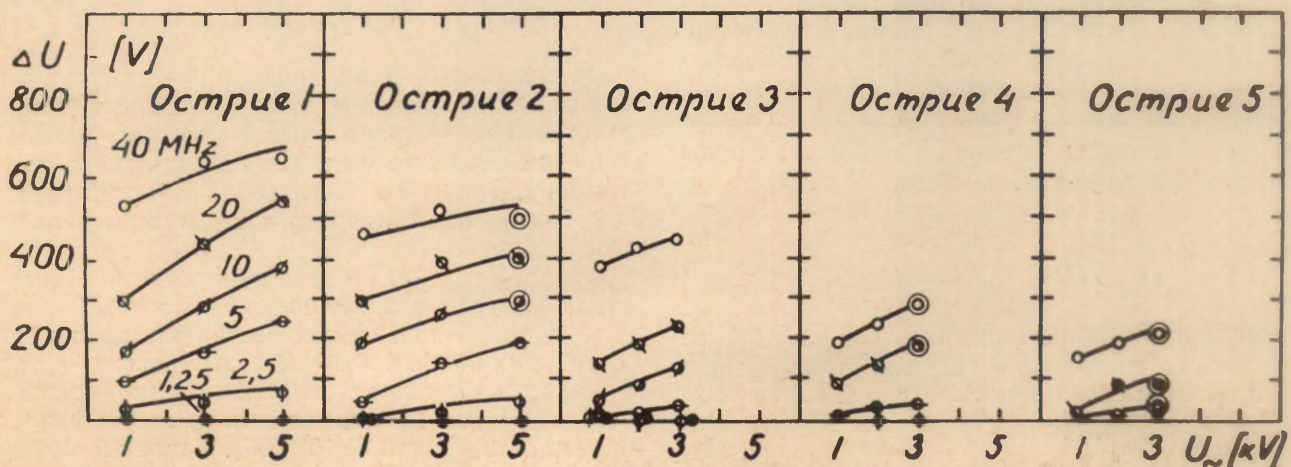


Рис. 28. Повышения порога стримеров на смешанном напряжении относительно порога на постоянном напряжении. Величины повышения измерены в вольтах при  $U_{\sim} = 1,0; 3,0; 5,0$  кВ.

димыми, для образования вспышечного импульса или стримера.

Исследования М. Амина с фотоумножителем позволили оценить время образования вспышечного импульса (острие 2,  $L = 4 \text{ cm}$ ) меньше  $10^{-7} \text{ sec}$  и время образования предначального стримера равным примерно  $2 \cdot 10^{-8} \text{ sec}$  [35, 36]. По наблюдениям В. Гей и С. Зайенца, время образования стримеров положительной короны (коаксиально-цилиндрическая геометрия разрядного промежутка) порядка  $5 \cdot 10^{-8} \text{ sec}$  [48]. Из исследований М. Менеса и А. Фишера следует, что время образования импульсов положительной короны при  $p = 700 \text{ mmHg}$  равно  $9 \cdot 10^{-8} \text{ sec}$  и убывает до  $5 \cdot 10^{-8} \text{ sec}$  с увеличением перенапряжения до 3% [95, 96, 49]. (Разрядным

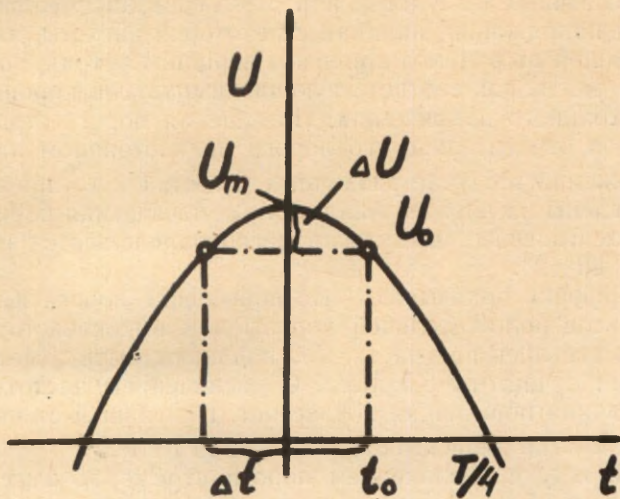


Рис. 29

промежутком в последних опытах было острие-плоскость:  $d = 0,014; 0,04; 0,06 \text{ cm}$ ,  $L = 0,5; 1,0$  и  $1,5 \text{ cm}$ , соответственно). (См. также статью Е. Брага и С. Стекольников [97]).

Длительность полупериода напряжения высокой частоты при  $\nu = 5,0 \text{ MHz}$ , начиная с которой в условиях наших опытов наблюдается заметное повышение порога импульсов положительной короны, равно  $10^{-7} \text{ sec}$ . Простой расчет покажет, что в случае острия 2 промежуток времени  $\Delta t$ , в течение которого приложенное к разрядному промежутку напряжение будет выше порога стримеров на постоянном напряжении, при  $U_0 = 3,0 \text{ kV}$  равно  $2,0 \cdot 10^{-8} \text{ sec}$ . На самом деле, из рис. 29 следует:

$$U_0 = U_m \cos \omega t_0, \quad (1)$$

здесь  $U_0 = U_{\text{стр}} - U_{\text{=}}$ ,

$U_m$  — амплитуда напряжения высокой частоты, соответствующая порогу стримеров на смешанном напряжении при  $U_{\text{=}} = \text{const}$ .

Из рис. 29 и уравнения (1)

$$\Delta t = 2t_0 = \frac{1}{\pi \nu} \arccos \frac{U_0}{U_m}. \quad (2)$$

По рис. 29

$$U_m = U_0 + \Delta U.$$

Так как по рис. 28  $\Delta U$  при  $\nu = 5 \cdot 10^6 \text{ Hz}$  и  $U_m = 3,0 \text{ kV}$  будет  $150 \text{ V}$ , то

$$\Delta t = \frac{1}{\pi \cdot 5 \cdot 10^6} \arccos \frac{2850}{3000} = 2,0 \cdot 10^{-8} \text{ sec}.$$

Выполненные таким же способом вычисления для других значений  $\Delta U$  и  $\nu$  графически представлены на рис. 30. Принимая  $\Delta t$  за время, минимально-необходимое для возникновения стримеров, графики на рис. 30 изображают также зависимость времен образования стримеров от перенапряжения  $\Delta U/U_{\text{стр}}$  (в рассуждениях не учитывается изменение длины стримеров на смешанном напряжении).

Экстраполяция кривых на рис. 30 до пересечения с осью ординат дает величину  $\Delta t$  равную, в случае острия 2 примерно  $2 \cdot 10^{-8} \text{ sec}$ . Она весьма хорошо согласуется со временем образования стримеров, полученным М. Аминым.

С уменьшением радиуса кривизны вершины острия время образования стримеров убывает. В случае острия 5,  $\Delta t = 5 \cdot 10^{-9} \text{ sec}$ . Заметно укорачивает время образования стримеров и перенапряжение. Оба факта как уменьшение  $\Delta t$  с уменьшением  $\rho$ , так и с увеличением  $\Delta U/U_{\text{стр}}$  качественно согласуются с результатами М. Менеса и К. Фишера [49].

Расчеты, аналогичные только что изложенным, можно применить и для вспышечных импульсов. Вычисления показали, что в пределах ошибок измерения время образования вспышечного импульса и его зависимость от перенапряжения совпадают со временем образования стримера. Является ли такое совпадение случайным или оно указывает на более существенную связь между обоими типами импульсов — в настоящее время сказать еще трудно. (М. Амин придерживается последней точки зрения [56]).

д) О механизме образования высокочастотной вспышки из стримера положительной короны

До сих пор мы лишь констатировали факт о возможности образования высокочастотных вспышек из стримера положительной короны, приводили экспериментальные факты в пользу такого предположения. Ниже мы попытаемся объяснить, каким же образом из стримера развивается высокочастотная вспышка.

Относительно стримеров положительной короны известно, что их прохождение сопровождается образованием большого количества электронов, положительных ионов и возбужденных частиц — атомов и молекул. В случае разрядного промежутка 1 и острия 2, число положительных ионов на  $1 \text{ cm}$  длины стримера равно  $6 \cdot 10^9$  [56]. Такое же количество создается электронов, а возбужденных частиц еще больше. При внезапном снятии приложенного

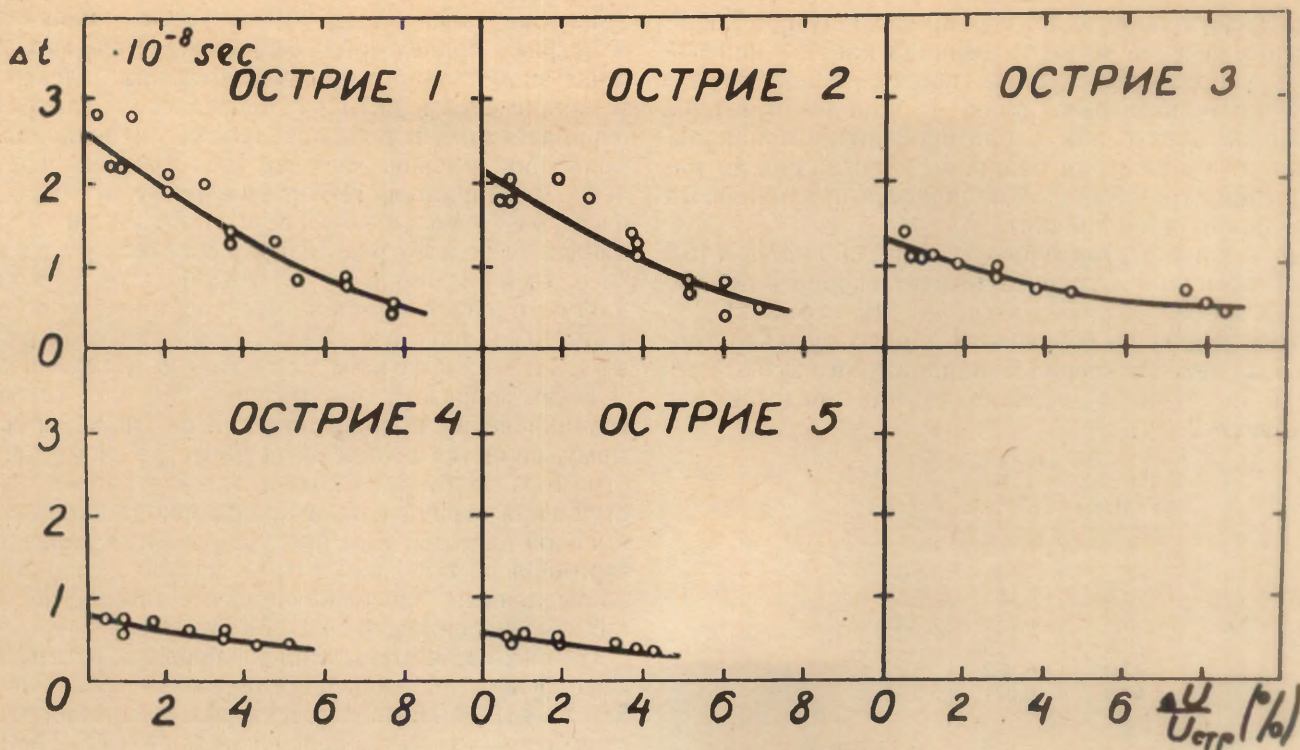


Рис. 30. Зависимость времени образования стримера от величины перенапряжения  $\frac{\Delta U}{U_{стр}}$ .

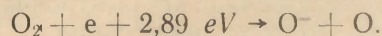
к разрядному промежутку напряжения или изменении его направления в противоположное описанное вследствие стримера ликвидируется не сразу. Попробуем выяснить функции отдельных компонентов стримера при наступлении отрицательного полупериода напряжения высокой частоты.

Положительные ионы из-за своей сравнительно большой массы вторичных электронов в объеме воздуха не образуют. Их присутствие выражается, вероятно, лишь в изменении распределения электрического поля около вершины острия.

Возбужденные атомы и молекулы имеют величину времени высвечивания порядка  $10^{-8} \text{ sec}$  [57a, 16]. Длительность четверти периода, в случае наивысшей, использованной нами частоты,  $T/4 = 0,0625 \cdot 10^{-6} \text{ sec}$ . К наступлению отрицательного полупериода возбужденные атомы и молекулы успевают, следовательно, переходить в свои нормальные состояния и, по-видимому, тоже постановщиками новых электронов служить не могут.

Обратимся к электронам. Сразу после своего образования в вершине стримера электрон начинает двигаться к острию. На своем пути первоначальное число электронов подвергается изменению. Часть их диффундирует из канала стримера, часть редомбинирует с положительными ионами, часть прилипает к  $O_2$ , образуя  $O^-$ . Л. Лёб [46], оценивая роль разных факторов уменьшения первоначального числа электронов в канале стримера, пришел к выводу, что наибольшие потери за  $t = 10^{-6} \text{ sec}$

обусловлены прилипанием электронов к молекулам кислорода по схеме



По подсчетам Н. Андерссона [25, 26], число отрицательных ионов на 1 см канала стримера сразу после его образования выражается формулой

$$n_- = n_0 (1 - e^{-\eta l}), \quad (3)$$

$n_0$  — число электронов на 1 см стримера

$l$  — длина стримера в см

$$\eta = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^{-1}.$$

В условиях наших опытов  $n_0 = 6 \cdot 10^9$  электронов/см [56] и  $l = 1,0 \text{ cm}$ . Из уравнения (3)  $n_-$  получится тогда равным  $\sim 10^8$  ионов/см.

К наступлению отрицательного потенциала смешанного напряжения  $n_-$  становится еще больше. Потери электронов из-за прилипания к молекулам кислорода действительно весьма значительны. С другой стороны, однако, маловероятно, чтобы к этому моменту, даже в случае наиболее низкой частоты, все электроны, не успевшие нейтрализоваться на острие, прилипались бы к  $O_2$  [46]. Часть их остается свободными.

Вычислим примерную длину пути электронов, оставшихся в канале стримера. Предполагая, что стример образуется при амплитудных значениях смешанного напряжения, можно считать, что дви-

жение электронов к острию происходит приблизительно в течение четверти периода напряжения высокой частоты (вследствие пространственного заряда положительных ионов в канале стримера, движение электронов в противоположном направлении, т. е. от острия начинается, очевидно, до наступления отрицательной полярности приложенного смешанного напряжения).

$X/p$  в канале стримера —  $10 \text{ V/cm mmHg}$  [46]. Такой величине  $X/p$  соответствует скорость движения электронов  $v = 5 \cdot 10^6 \text{ cm/sec}$  [46, стр. 231].

Вычисленные на основе этих данных пути электронов  $S$  за четверть периода напряжения высокой частоты, в случае различных частот, представлены в таблице 2.

Таблица 2.

$\nu$ (MHz)	$S$ (cm)	$l$ (cm)
1,25	1,000	1,00
2,5	0,500	0,80
5,0	0,250	0,45
10,0	0,125	0,25
20,0	0,0625	0,05
40,0	0,0312	0,025

Здесь же показаны измеренные длины стримеров  $l$  на смешанном напряжении около границы возникновения высокочастотных вспышек  $CC'$  (микроскопические измерения). Сравнение значений  $S$  и  $l$  указывает на их приблизительное равенство. Последнее означает, что  $T/4$  — это время, в течение которого электроны в вершине стримера достигают поверхности острия.

На самом деле движение электронов более медленное.  $X/p = 10$  в условиях короны постоянного напряжения. В случае смешанного напряжения приложенное к разрядному промежутку напряжение после достижений своего амплитудного значения быстро убывает. Следовательно, понижается и  $X/p$ , и из-за последнего — скорость движения электронов. Действительные величины  $S$  будут поэтому несколько меньше  $l$ , и часть электронов в вершине стримера из-за этого разрядный промежуток покинуть не успевают.

После изменения знака приложенного напряжения на противоположный, или даже до того, когда напряженность электрического поля пространственного заряда положительных ионов в канале стримера становится преобладающей над величиной напряженности приложенного поля, направление движения электронов изменится на противоположное. На своем пути от острия эти электроны могут образовать при столкновении с нейтральными молекулами или атомами новые электроны и за  $T/4$  проходят большие расстояния, чем в течение предыдущего четверть-периода напряжения высокой частоты. (Пространственный заряд положительных ионов, в случае отрицательных полупериодов напряжения высокой частоты, в отличие от положительных способствует движению электронов от поверхности острия). Во время положительного полупериода

движение электронов будет опять направлено к острию, причем оно сопровождается образованием значительного количества новых электронов в канале стримера. При наступлении следующих отрицательных и положительных полупериодов напряжения высокой частоты весь процесс периодически повторяется. Постепенное, периодическое увеличение ионизации в канале стримера и распространение его таким путем в глубину разрядного промежутка, вероятно, и образует мощное высокочастотное образование — высокочастотную вспышку.

Таким образом, мы получим то, что условием возникновения высокочастотной вспышки, по-видимому, является необходимость отставания в канале стримера некоторого количества электронов до наступления отрицательного полупериода напряжения высокой частоты. Сам процесс развития первичного стримера до высокочастотной вспышки сравнительно медленный, продолжающийся в течение нескольких тысяч периодов (рис. 31, 32).

На рис. 31, 32 представлены осциллограммы тока высокочастотных вспышек на участке  $BC$ . Частота 5,0 и 10,0 MHz соответственно. Осциллограммы стримеров получены перед границей  $CC'$ . На масштабе времени каждому делению соответствует  $10^{-4} \text{ sec}$ .

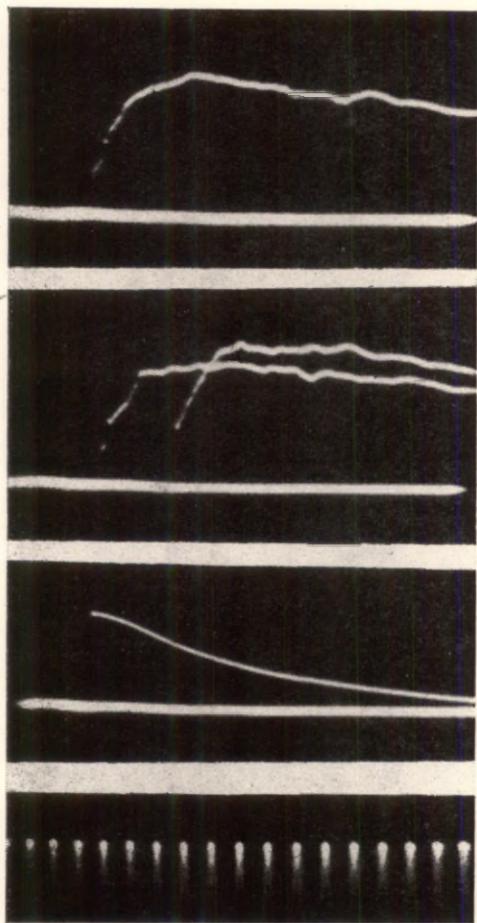
При  $\nu > 10,0 \text{ MHz}$  осциллограммы высокочастотных вспышек подобны осциллограммам рис. 32, в случае  $\nu < 5,0 \text{ MHz}$  — осциллограммам рис. 31.

Времена развития высокочастотных вспышек, определяемые из осциллограмм рис. 31 и 32, равны  $3 \cdot 10^{-4} - 6 \cdot 10^{-4} \text{ sec}$ .

Из рис. 12—17 следует, что в случае  $\nu \geq 10 \text{ MHz}$  высокочастотные вспышки в области  $BCC'D$  более однородные, чем при  $\nu < 10 \text{ MHz}$ . К аналогичному заключению мы приходим и из рассмотрения осциллограмм на рис. 31 и 32.

Зависимость формы высокочастотных вспышек от частоты объясняется, по-видимому, тем, что в случае более высоких частот канал стримера из-за меньшей длительности  $T/4$  к моменту наступления следующего полупериода напряжения высокой частоты будет более проводящим, чем в случае менее высоких частот (в меньшей степени сказываются диффузия и рекомбинация заряженных частиц). Поэтому движение электронов происходит по одному и тому же первоначальному каналу стримера, лишь постепенно удлиняя его. В случае более низких частот канал стримера к следующему полупериоду напряжения высокой частоты по тем же причинам будет менее проводящим. Здесь не обязательно, чтобы каждый следующий стример развивался по пути предыдущего. Возможны разветвления. Отдельным разветвленным стримерам, по-видимому, соответствуют и отдельные резкие скачки тока на осциллограммах высокочастотных вспышек при  $\nu \leq 5 \text{ MHz}$  (рис. 31).

Выше мы привели лишь весьма качественную картину возможного механизма образования высо-

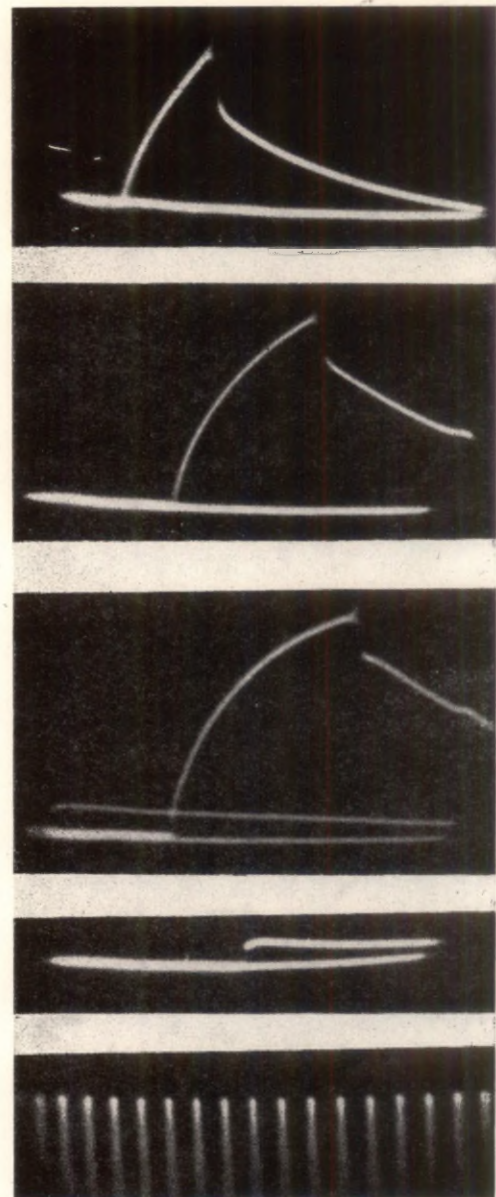


$U_{\pm} = 2,5 \text{ kV}$   
 $U_{\sim} = 5,5 \text{ kV}$

$U_{\pm} = 3,0 \text{ kV}$   
 $U_{\sim} = 5,0 \text{ kV}$

$U_{\pm} = 3,0 \text{ kV}$   
 $U_{\sim} = 5,0 \text{ kV}$

$\nu = 10^4 \text{ Hz}$



$U_{\pm} = 2,0 \text{ kV}$   
 $U_{\sim} = 6,0 \text{ kV}$

$U_{\pm} = 2,5 \text{ kV}$   
 $U_{\sim} = 5,5 \text{ kV}$

$U_{\pm} = 3,0 \text{ kV}$   
 $U_{\sim} = 5,0 \text{ kV}$

$U_{\pm} = 3,5 \text{ kV}$   
 $U_{\sim} = 4,5 \text{ kV}$

$\nu = 10^4 \text{ Hz}$

Рис. 31. Осциллограммы тока высокочастотных вспышек на участке  $BC$  и стримера около границы  $CC'$ .  $\nu = 5,0 \text{ MHz}$ . Масштаб времени —  $10^4 \text{ Hz}$ .

Рис. 32. Осциллограммы тока высокочастотных вспышек на участке  $BC$  и стримера около границы  $CC'$ .  $\nu = 10,0 \text{ MHz}$ . Масштаб времени —  $10^4 \text{ Hz}$ .

кочастотных вспышек из стримеров положительной короны (она соответствует области напряжения  $BCC'D$  на рис. 20—24). Более детальный анализ в настоящее время затруднен, хотя бы из-за отсутствия полных количественных характеристик самих стримеров.

В качестве замечания интересно отметить то, что факт облегчения пробоя из-за отставания в разрядном промежутке продуктов предыдущего разряда был замечен рядом других авторов. К. Волерас в случае разрядного промежутка стержень — стержень в воздухе при нормальном давлении наблюдал, что времена восстановления разрядного промежутка до 40% и 90% от первичной пробивной прочности равны соответственно 170 и 950  $\mu\text{sec}$  [98]. Аналогичный результат в плоско-параллельном разрядном промежутке был получен А. Рубинским [99]. А. Акопян, В. Ларионов и А. Моросян наблюдали (положительно заряженное острие — отрицательная плоскость), что развитие пробоя не будет прервано при понижении приложенного к разрядному промежутку напряжения ниже пробивного, даже в течение 2—3  $\mu\text{sec}$  [100]. Результаты этих опытов, изложенную точку зрения относительно механизма образования высокочастотной вспышки из стримера положительной короны, представляющей собой неполный пробой разрядного промежутка, хотя косвенно, но все же тоже подтверждают.

Что касается механизма образования высокочастотных вспышек на участках выше границы  $DG$ , то он, по-видимому, не отличается от только что описанного. Менее ясным остается факт возникновения самих стримеров при столь низких значениях смешанного напряжения. (В случае постоянного напряжения и острий 1, 2, 3, стримеры возникают вторич-

но при напряжениях, многократно превышающих порог предначальных стримеров).

На участке  $AB$  (рис. 20—24) порог возникновения высокочастотных вспышек ниже, чем на участке  $BC$ . Это понижение А. Прокофьеву было известно уже в 1937 году [85]. Впоследствии величину порога возникновения высокочастотного разряда измерял О. Кабардин. В случае частот 2,5 и 1,25  $\text{MHz}$  (рис. 14, 20 и рис. 15, 21), на некотором участке левее от  $B$  порог возникновения высокочастотных вспышек, по нашим данным, равен порогу вспышечных импульсов положительной короны. При дальнейшем увеличении высокочастотной составляющей смешанного напряжения он становится и ниже последнего. На этом участке напряжения, а также, по-видимому, на всем участке  $AB$  решающую роль в образовании высокочастотных вспышек, вероятно, играют отрицательный полупериод напряжения высокой частоты и положительный пространственный заряд от отдельных лавин или даже вспышечных импульсов, повышающий величину электрического поля около поверхности острия во время отрицательных полупериодов и понижающие, таким образом, порог высокочастотных вспышек ниже порога импульсов короны постоянного напряжения. Возможную роль пространственного заряда положительных ионов в качестве фактора, облегчающего возникновение высокочастотных вспышек, А. Прокофьев отметил впервые в 1939 году [89]. На накопление пространственного заряда положительных ионов, особенно в случае более высоких частот указывает, по-видимому, сама форма высокочастотных вспышек и характер ее изменения с увеличением постоянной составляющей смешанного напряжения (рис. 15—17).

## ГЛАВА 2

### ВЛИЯНИЕ МОДУЛЯЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРЯДА. СЧЕТЧИК ИОНОВ НА ПРЕИМУЩЕСТВЕННО ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ПОЛУПЕРИОДАХ НАПРЯЖЕНИЯ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

#### А. ВОЛЬТ-ВОЛЬТОВЫЕ И СЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

##### а) Разрядный промежуток 1, острие 2

Вольт-вольтовые характеристики разряда с острия для случая модулированного высокочастотного напряжения представлены на рис. 33.

Сравнение между собой вольт-вольтовых характеристик на рис. 33 и рис. 21 не обнаруживает какой-либо разницы в пороговых напряжениях возникновения соответствующих импульсов разряда смешанного напряжения в зависимости от модуляции (за исключением небольших значений постоянного напряжения, включая  $U_{-} = 0$ , при которых порог высокочастотных всплесков в случае модулированного высокочастотного напряжения несколько выше, чем без модуляции). Более значительно, как следует из такого же сравнения, изменились формы областей возникновения высокочастотных всплесков и стримеров положительной короны. Образовалась новая широкая область  $CD'D'C'$ , в которой одновременно наблюдаются как высокочастотные всплески, так и стримеры, всплывающие импульсы, непрерывная всплывающая корона.

Счетные характеристики высокочастотных всплесков и стримеров представлены на рис. 34. Счетные характеристики на рис. 34 были сняты при  $U_{-} = U_{\min} + 500 \text{ V} = \text{const}$ ,  $U_{\min}$  — минимальная величина амплитуды возникновения высокочастотных всплесков около границы  $CC'$ . На рис. 34 представлена также счетная характеристика стримеров, полученная при замене напряжения высокой частоты модулирующим его напряжением, т. е. напряжением промышленной частоты. (Схема питания разрядного промежутка переменным напряжением в  $50 \text{ Hz}$  показана на рис. 10). Счетные характеристики были получены при наличии в разрядном промежутке начальных ионов трех различных концентраций  $i$ .

##### б) Разрядный промежуток 2, острие 2

На рис. 35 представлены вольт-вольтовые характеристики разряда для случая модулированного высокочастотного напряжения. Подобные характеристики непрерывного напряжения высокой частоты показаны на рис. 36.

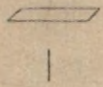
Счетные характеристики импульсов разряда представлены на рис. 37. Характеристики сняты при  $U_{\max} = 4,5 \text{ kV}$ ,  $U_{\max}$  — максимальная величина амплитуды напряжения высокой частоты. На рис. 37, вместо счетной характеристики стримеров, приведена счетная характеристика суммарного числа импульсов (суммарное число импульсов в единицу времени = число стримеров в единицу времени + число высокочастотных всплесков в единицу времени). Счетная характеристика стримеров может быть получена путем графического вычитания из одной кривой другой.

На рис. 38 представлены счетные характеристики стримеров напряжения  $50 \text{ Hz}$  при различных значениях  $U_{-} = \text{const}$ .

Осциллограммы импульсов тока при указанных на рисунке величинах  $U_{\max}$  и  $U_{+}$  приведены на рис. 39. Напряжение высокой частоты модулированное,  $\nu = 5 \text{ MHz}$ .

#### Б. ОБСУЖДЕНИЕ

Из экспериментальных результатов, представленных на рис. 33—39, без особых комментариев становится ясным как влияние модуляции напряжения высокой частоты на области возникновения высокочастотных всплесков и стримеров положительной короны на смешанном напряжении, так и механизм работы счетчика ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты. Для конкретности изложения ведем обсуждение относительно разрядного промежутка 2 и  $\nu = 5 \text{ MHz}$ .



$d=1,0\text{ mm}, L=4\text{ cm}$

Форма напряжения в.ч.:

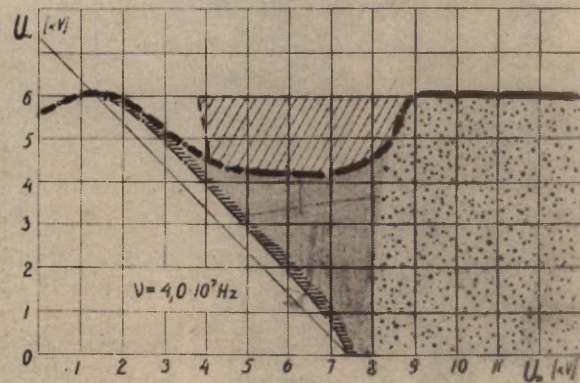
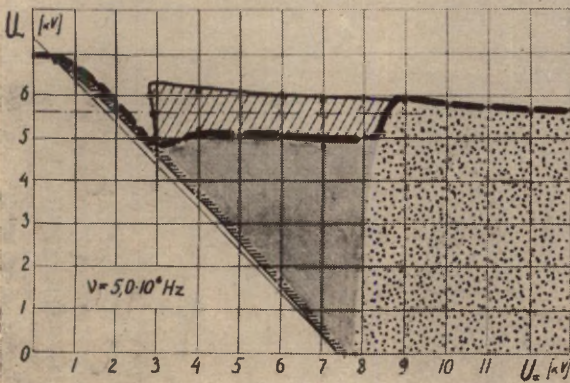
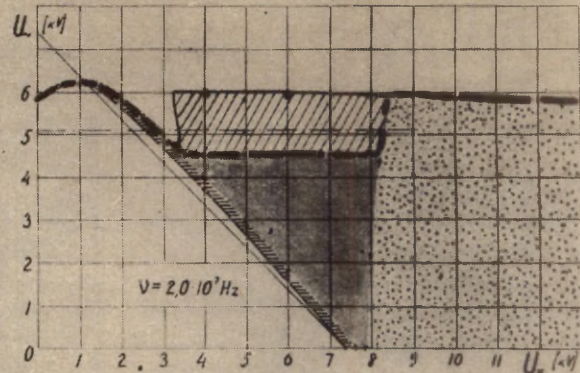
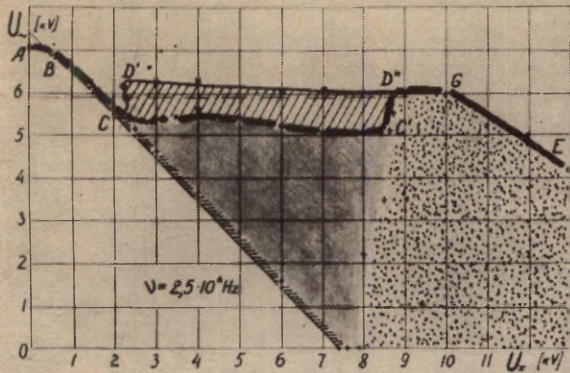
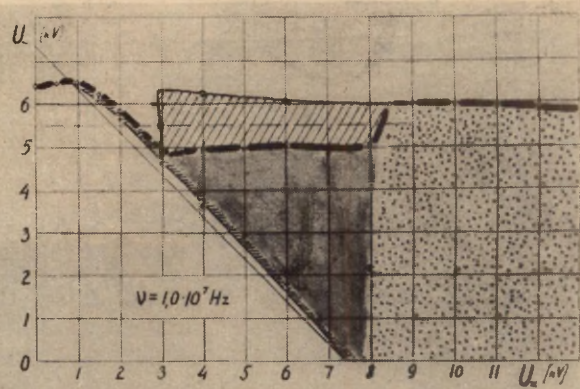
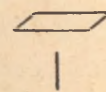


Рис. 33. Вольт-вольтные характеристики разряда в случае модулированного высокочастотного напряжения. Разрядный промежуток 1, острие 2. Наклонными линиями заштрихованы области напряжений, в которых наблюдаются как высокочастотные всплески, так и стримеры и непрерывная всплывчатая корона.

  $d = 1,0 \text{ mm}, L = 4,0 \text{ cm}$

форма напряжения в.ч.



● ○ ● стримеры  
 △ + ▼ в.ч. вспышки

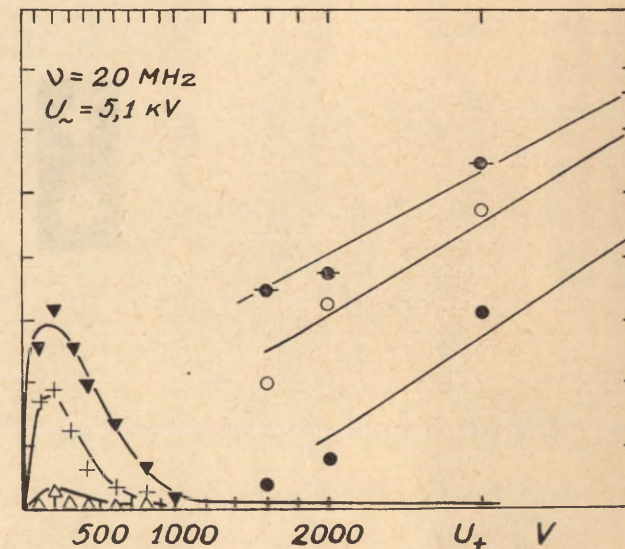
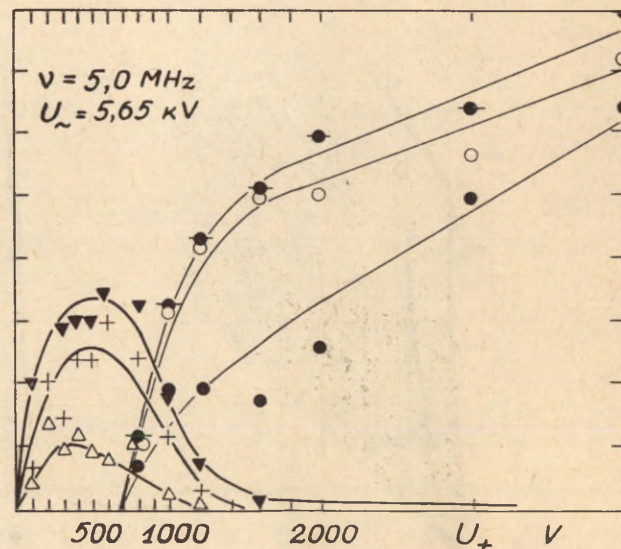
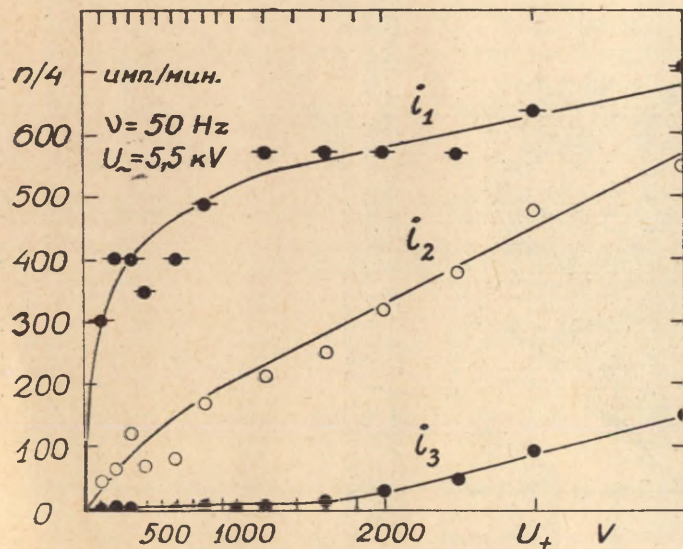
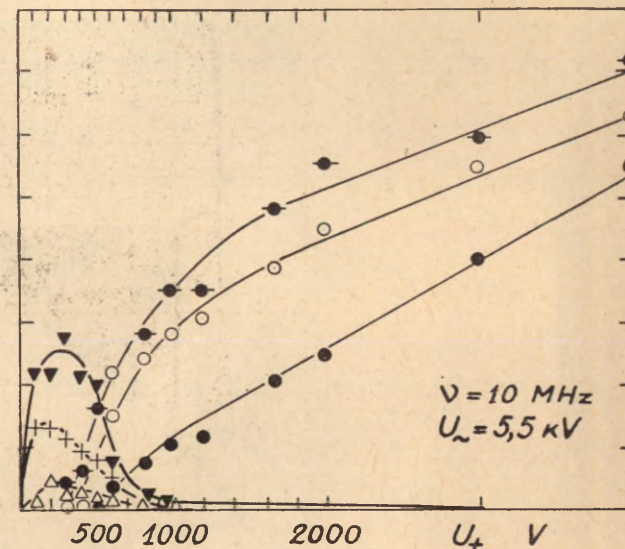
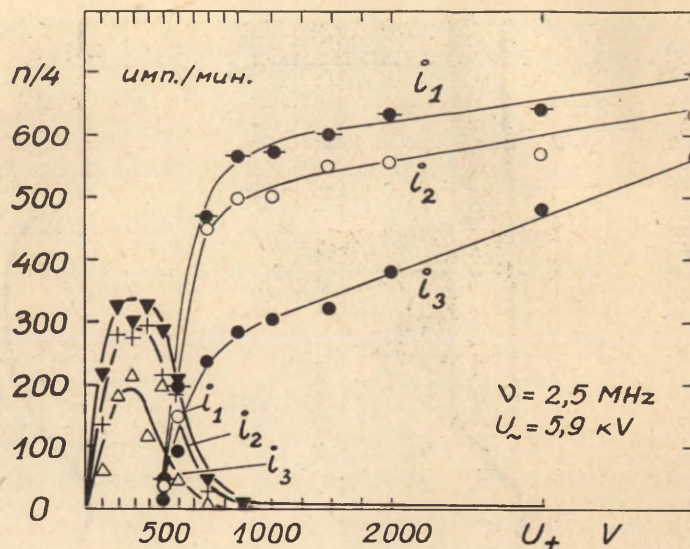


Рис. 34. Счетные характеристики стримеров и высокочастотных вспышек. Начальная ионизация  $i_1$  — естественная,  $i_2$  — дополнительная ионизация создана  $\gamma$ -активным источником, расположенным на расстоянии 20 см от основания острья. Интенсивность  $\gamma$ -источника эквивалентна 0,0335 мг радия.  $i_3$  — интенсивность  $\gamma$ -источника на расстоянии 20 см от острья в два раза больше чем в предыдущем случае.

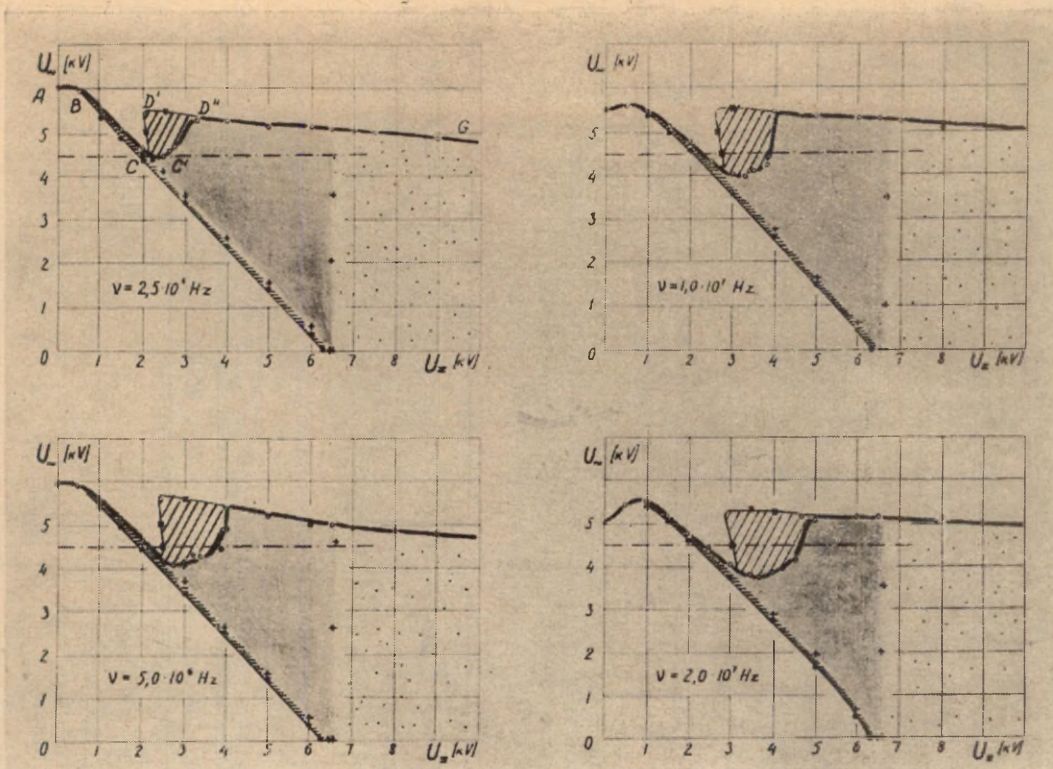


Рис. 35. Вольт-вольтные характеристики разряда в случае модулированного высокочастотного напряжения. Разрядный промежуток 2, острие 2.

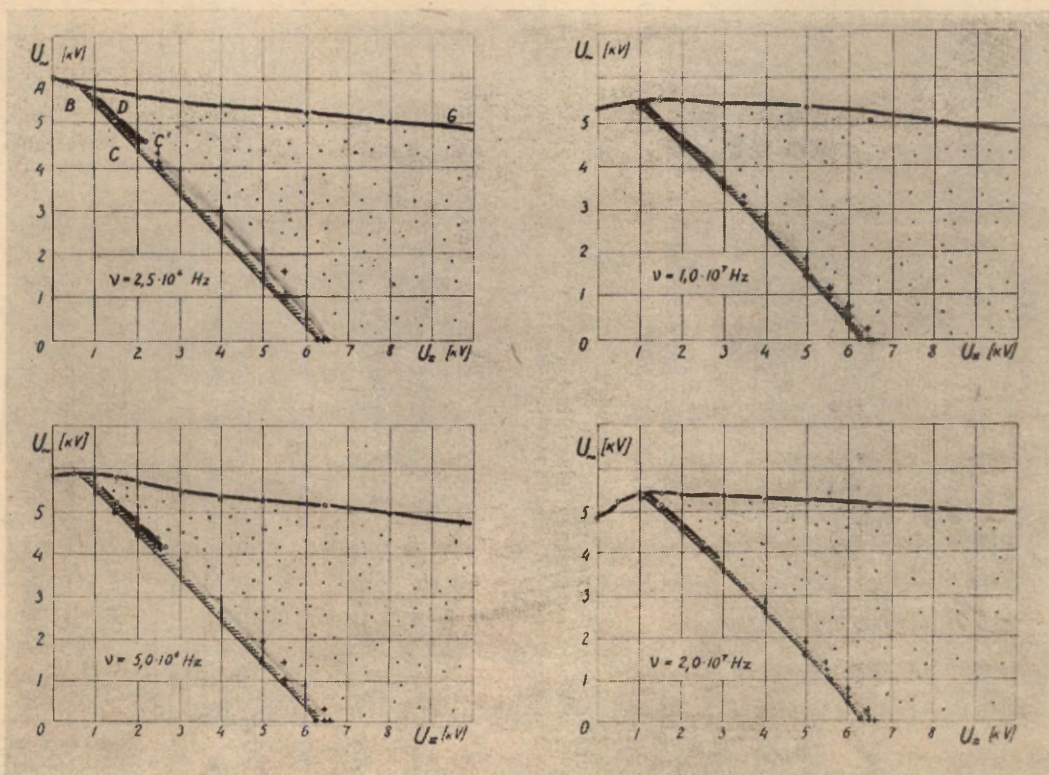


Рис. 36. Вольт-вольтные характеристики разряда в случае немодулированного напряжения высокой частоты. Разрядный промежуток 2, острие 2.

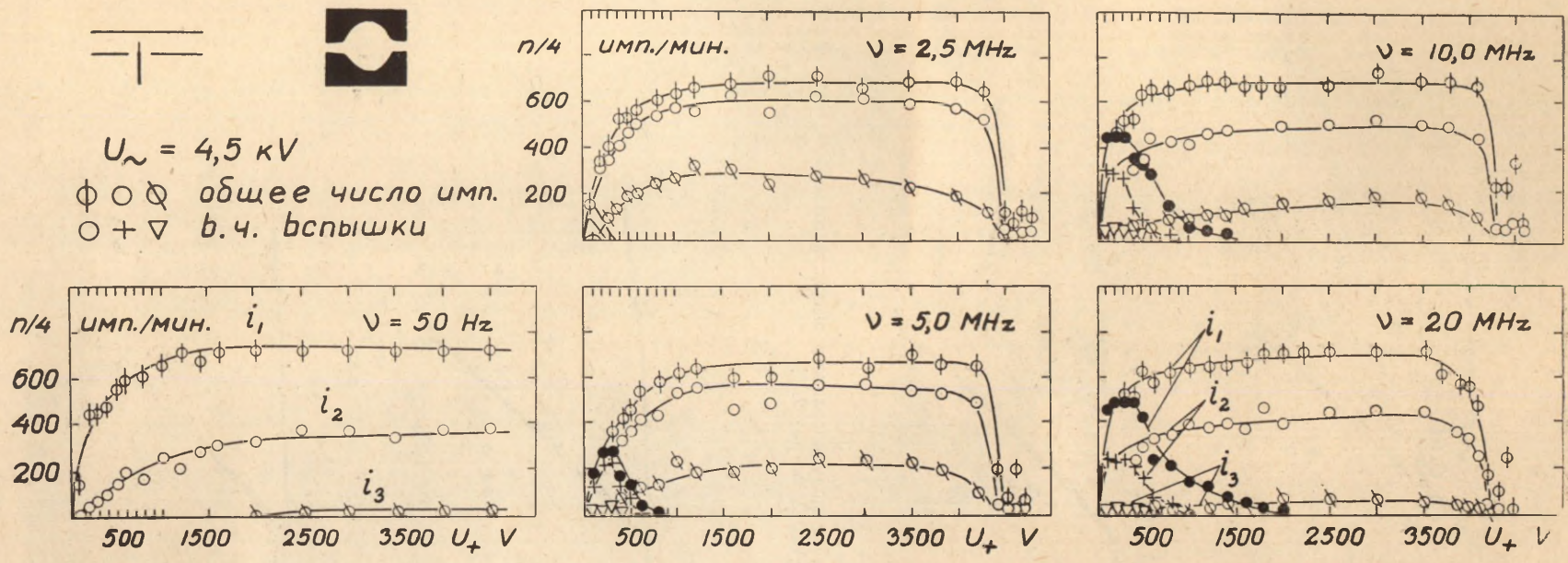


Рис. 37. Счетные характеристики стримеров и высокочастотных вспышек. Разрядный промежуток 2, острие 2. Начальная ионизация  $i_1$  — естественная.  $i_2$  — дополнительная ионизация создана  $\gamma$ -активным источником, расположенным на расстоянии 20 см от входа трубы. Интенсивность  $\gamma$ -источника эквивалента 0,0335 мг радия.  $i_3$  — интенсивность  $\gamma$ -источника в два раза больше, чем в предыдущем случае.

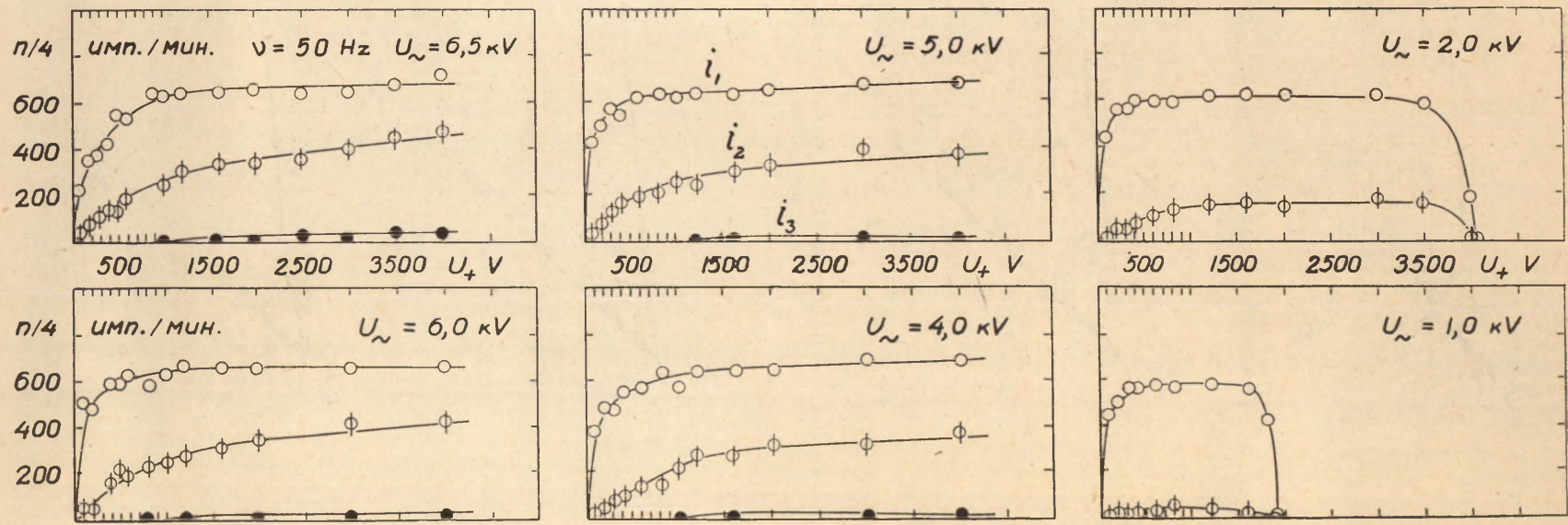


Рис. 38. Счетные характеристики стримеров при одновременном питании разрядного промежутка постоянным напряжением и синусоидальным напряжением промышленной частоты. Начальная ионизация такая же как в случае рис. 37.

$U_{\perp}$  kV

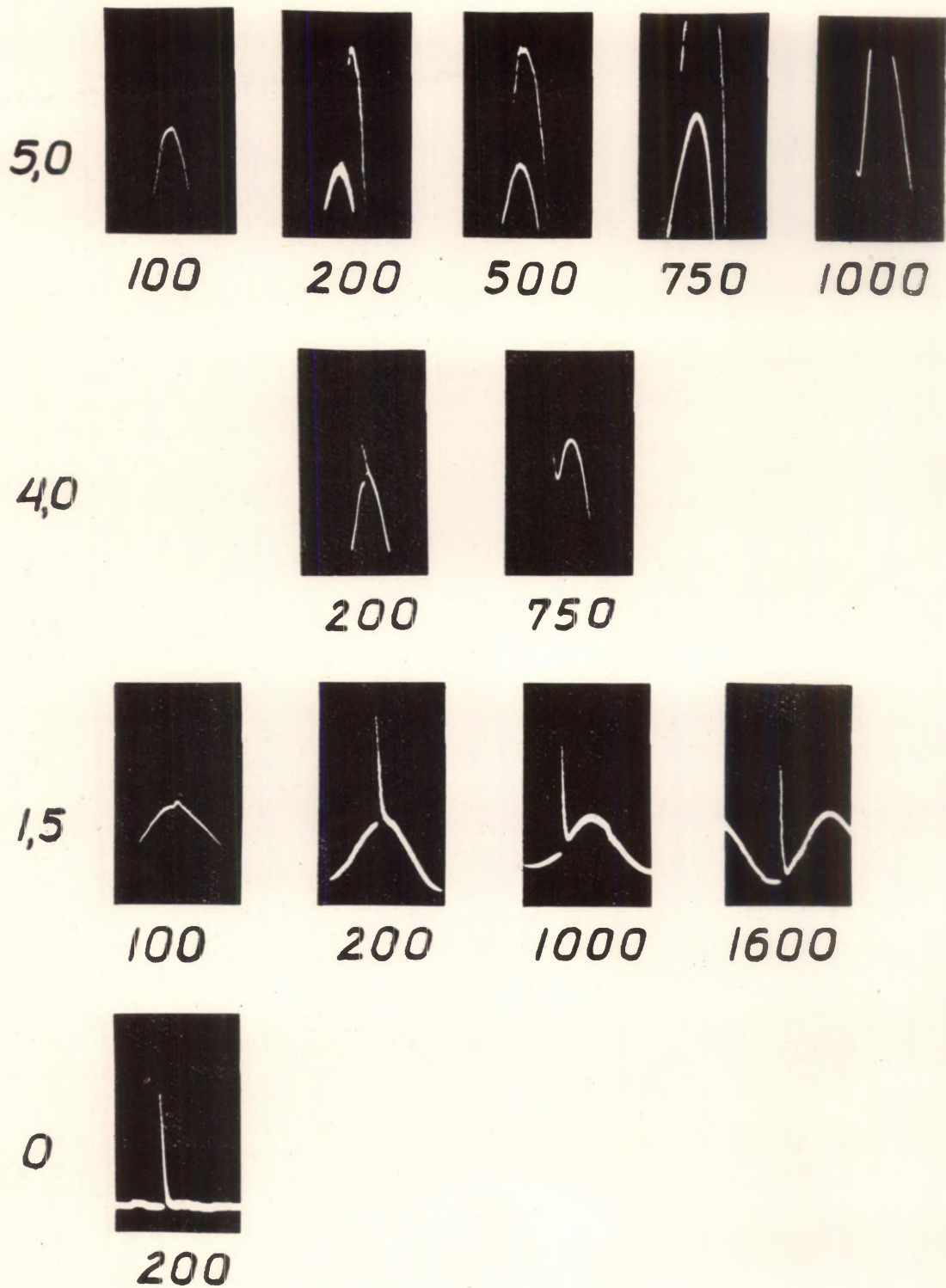


Рис. 39. Осциллограммы тока импульсов разряда. Разрядный промежуток 2, острие 2.  $\nu = 5,0$  MHz. Напряжение высокой частоты модулированное. Части синусоиды на фотографиях соответствуют частоте 50 Hz (модулирующая частота). Под осциллограммами даны величины перенапряжения  $U_{\perp}$  в вольтах относительно порога вспыхивающих импульсов при указанных  $U_{\perp}^{\max} = \text{const}$ .

На рис. 36 видно, что область возникновения стримеров в случае постоянного напряжения весьма узкая, равная примерно 50 вольтам. Она заметно не изменилась и при питании разрядного промежутка одновременно сглаженным высокочастотным и постоянным напряжением. Ширина области возникновения высокочастотных вспышек  $BCC'D$  примерно такая же. Причины такой формы областей нами обсуждались выше.

В случае модулированного высокочастотного напряжения как стримеры, так и высокочастотные вспышки возникают в более широких интервалах изменений  $U_{\pm}$  и  $U_{\pm}$ . Ширина областей по постоянному напряжению тем больше, чем больше  $U_{\pm}^{\max}$ .

Причины влияния модуляции на области возникновения импульсов разряда выясняются на основе осциллограмм рис. 39.

Нижняя фотография на рис. 39 соответствует осциллограммам вспышечного импульса и стримера короны постоянного напряжения. Следующая серия осциллограмм заснята при  $U_{\pm}^{\max} = 1,5 \text{ kV}$ . Части синусоиды на фотографиях соответствуют частоте модулирующего напряжения, т. е.  $50 \text{ Hz}$ . Видно, что при постепенном увеличении  $U_{\pm}$  возникают сперва вспышечные импульсы, затем стримеры. Дальнейшее увеличение  $U_{\pm}$  заставляет стример возникать не при максимальных значениях смешанного напряжения, а при  $U_{\pm} < U_{\pm}^{\max}$ . Чем больше  $U_{+}$ , тем меньше  $U_{-}$  возникновения стримера (здесь  $U_{+}$  — величина перенапряжения по постоянному напряжению относительно порога вспышечных импульсов). Стримеры образуются все время как бы при одном и том же значении смешанного напряжения. Прекращаются стримеры в условиях обсуждаемой геометрии разрядного промежутка при  $U_{+} = U_{\pm}^{\max}$ .

Развитие стримера, как и в случае постоянного или смешанного напряжения (напряжение высокой частоты немодулированное), сопровождается образованием вслед за ним вспышечного импульса (рис. 39). В условиях модулированного высокочастотного напряжения вспышечные импульсы, однако, не возникают в виде отдельных импульсов (в перенапряженном режиме), а представляют собой части непрерывной вспышечной короны, существующие до тех пор, пока амплитуда смешанного напряжения не становится ниже порога предначальных стримеров или еще меньше. Мы также не наблюдали, чтобы в случае обсуждаемой конфигурации разрядного промежутка на одном импульсе напряжения высокой частоты образовалось бы более одного стримера.

Из осциллограмм равенство ширины области возникновения стримеров максимальной амплитуде высокочастотного напряжения весьма очевидно. Действительно, в случае модулированного высокочастотного напряжения амплитуда смешанного напряжения пробегает значения от  $U_{\pm}$  до  $U_{\pm} + U_{\pm}^{\max}$ . (Мы пренебрегаем отрицательными полупериодами напряжения высокой частоты. Во время отрица-

тельных полупериодов разрядный промежуток сильно загрязнен положительными ионами от импульсов разряда положительных полупериодов. Образование стримера здесь невозможно). Если при этом  $U_{\pm} \leq U_{\text{стр}} \leq U_{\pm} + U_{\pm}^{\max}$ , то стример, в случае отсутствия мешающего фактора в виде пространственного заряда положительных ионов, развиваться может. ( $U_{\text{стр}}$  — напряжение возникновения стримера при отсутствии модуляции. Ширину области возникновения стримеров из-за ее незначительной величины для простоты обсуждения в расчет не принимаем). При  $U_{\pm} > U_{\text{стр}}$  стримеры не могут существовать из-за положительных пространственных зарядов непрерывной вспышечной короны. Следовательно, ширина области возникновения стримеров равна  $U_{\pm}^{\max}$ .

Теперь о других особенностях возникновения стримера в случае модулированного высокочастотного напряжения. Выше мы отметили, что во время одного импульса напряжения высокой частоты наблюдалось не более одного стримера. Объяснить этот факт можно на основе следующего:

Из опыта известно, что длительность вспышечного импульса около порога стримеров — порядка миллисекунды (см., например [32] или рис. 12). В области напряжения возникновения стримеров число вторичных импульсов в каждом вспышечном импульсе еще больше, следовательно, больше и его длительность.

Допустим, что первичный вспышечный импульс образовался в тот момент, когда величина смешанного напряжения равнялась порогу стримеров, но  $U_{\text{стр}} < U_{\pm} + U_{\pm}^{\max}$ . Вслед за первичным импульсом образуются вторичные. Поскольку напряжение постепенно возрастает, то образование вторичных импульсов облегчено. (Чем больше величина перенапряжения, тем больше число вторичных импульсов в каждом вспышечном импульсе [32]).

Ширина области возникновения стримеров на немодулированном смешанном напряжении  $\Delta U$ , как мы убедились, не более 50—100 V. Оценим величину промежутка времени, в течение которого модулированное напряжение пробегает этот интервал напряжений. В качестве примера берем

$$U_{\pm}^{\max} = 1,5 \text{ kV} \text{ и } U_{\pm} = 1,0 \text{ kV} \quad (U_{\pm} = U_{\text{стр}} - U_{\pm})$$

Из схемы на рис. 40 имеем

$$U'_{\pm} = U_{\pm}^{\max} \cos \omega t_1 \text{ и} \\ U''_{\pm} = U_{\pm}^{\max} \cos \omega t_2$$

По условию,  $\Delta U_{\text{стр}} = U''_{\pm} - U'_{\pm} = 100 \text{ V}$ .

Следовательно,

$$\Delta t = |t_2 - t_1| = \frac{1}{\omega} \left| \arccos \frac{U''_{\pm}}{U_{\pm}^{\max}} - \arccos \frac{U'_{\pm}}{U_{\pm}^{\max}} \right| \\ = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50} \left| \arccos \frac{1,1}{1,5} - \arccos \frac{1,0}{1,5} \right| \approx 3,0 \cdot 10^{-4} \text{ sec.}$$

Полученный результат означает, что за время развития вспыхивающего импульса величина приложенного напряжения успевает пересекать область возникновения стримеров положительной короны и попадает в область существования непрерывной вспыхивающей короны. В этом, вероятно, и заключается причина самоподдерживания вспыхивающего импульса до непрерывной вспыхивающей короны в условиях модулированного высокочастотного напряжения.

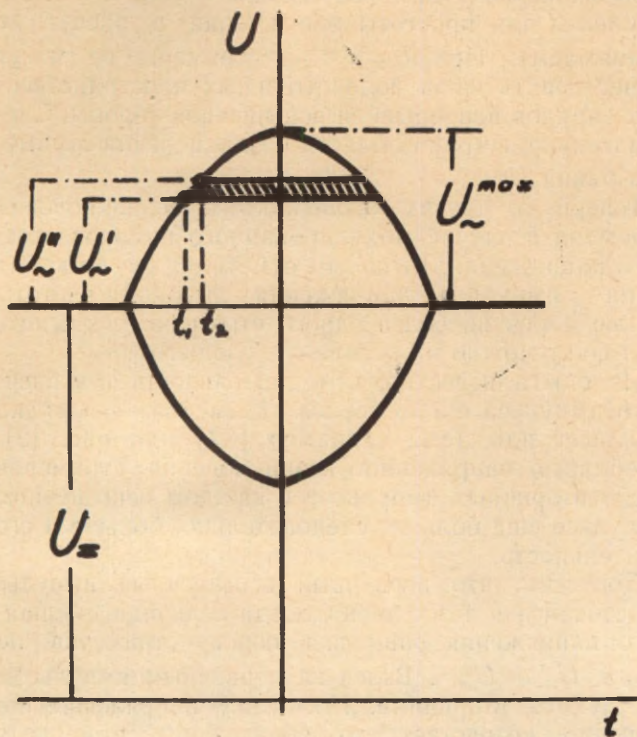


Рис. 40.

Выше мы предполагали, что вспыхивающий импульс образовался при  $U = U_{стр}$ . Это условие является не обязательным. Так как  $\Delta t = 10^{-4} \text{ sec}$ , а в случае более высоких значений  $U_-$  и  $U_- \Delta t$  еще меньше, то самоподдерживаться может и вспыхивающий импульс, возникший при напряжении несколько ниже порога стримеров. Важно лишь то, что время существования вспыхивающего импульса было больше промежутка времени, за которое приложенное напряжение возрастает до порога вспыхивающей короны.

Появление электрона или отрицательного иона около вершины острия носит случайный характер. Окажется он около поверхности острия при величине суммарного напряжения  $U$ , удовлетворяющей условию  $U_0 \leq U < U_{стр}$ , — образуется вспыхивающий импульс, и возникновение стримера уже невозможно (см. первую главу части I);  $U_0$  — величина напряжения, ниже которой вспыхивающий импульс самоподдерживаться не может. Появится начальный ион при  $U \geq U_{стр}$ , — образуется стример. За стримером следует вспыхивающий импульс. Поскольку вспыхивающий

импульс в этом случае обязательно будет самоподдерживающимся, то образовавшийся стример в течение рассматриваемого импульса напряжения высокой частоты будет единственным.

Таковы особенности возникновения импульсов разряда на модулированном смешанном напряжении при  $U_- < U_{мин}^*$ .

Обратимся к случаю  $U_- \geq U_{мин}^*$ .

Серия осциллограмм, заснятая для  $U_{max} = 5,0 \text{ kV}$  при различных значениях  $U_+$ , представлена на рис. 39. (Из рис. 35 и 36 видно, что значение  $U_{max} = 5,0 \text{ kV}$  условие  $U_- \geq U_{мин}^*$  удовлетворяет). Первая осциллограмма в этой серии соответствует вспыхивающему импульсу положительной короны, вторая — высокочастотной вспышке около порога стримеров. Увеличение  $U_+$  приводит к тому, что высокочастотная вспышка, как и стример в вышеобсуждаемом случае, при максимальных значениях смешанного напряжения не образуется. Чем больше  $U_+$ , тем меньше  $U_-$  возникновения высокочастотной вспышки. Начиная с определенной величины  $U_+$ , появляются стримеры (рис. 39). С увеличением  $U_+$  вероятность возникновения высокочастотных вспышек убывает, число стримеров в единицу времени возрастает. При  $U_+ > U_{max}$  нет и стримеров, наблюдается одна непрерывная вспыхивающая корона.

Механизм прекращения высокочастотных вспышек с увеличением  $U_-$  ясен из схемы на рис. 41. На этой схеме показана форма смешанного напряжения при  $U_{max} = 5,0 \text{ kV}$  и при различных значениях  $U_-$  (или  $U_+$ ).  $U_{мин}^* < U_{max}$ . Величину  $U_- - U_{мин}^* > 0$  характеризует часть импульса напряжения высокой частоты, залитая сплошь.

$U_{max} + U_0'$  соответствует порогу вспыхивающих импульсов. С дальнейшим увеличением  $U_-$  достигается порог стримеров  $U_{стр} = U_{max} + U_0''$ . Так как  $U_-$  при этом больше  $U_{мин}^*$  то вместо стримера наблюдается высокочастотная вспышка. Высокочастотные вспышки могут возникать до тех пор, пока значение  $U_-$ , соответствующее порогу стримеров, не будет меньше  $U_{мин}^*$ . Если последнее случится, то высокочастотная вспышка будет заменена стримером. (Случай  $U_- = U_0^{IV}$  и  $U_0^V$  на рис. 41).

Прекращение стримеров с увеличением  $U_+$  обсуждалось выше.

Таков механизм возникновения и прекращения высокочастотных вспышек с увеличением  $U_-$  в условиях модулированного высокочастотного напряжения или то же самое — в счетчике ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты.

<sup>4</sup> Необходимо отметить, что для выяснения роли модуляции умышленно было выбрано такое смешанное напряжение, которое относительно вероятности возникновения стримеров и вспыхивающих импульсов приблизительно эквивалентно постоянному напряжению. Учет особенностей напряжения высокой частоты сделал бы рассуждения более громоздкими, что нежелательно для подчеркивания главного в них.

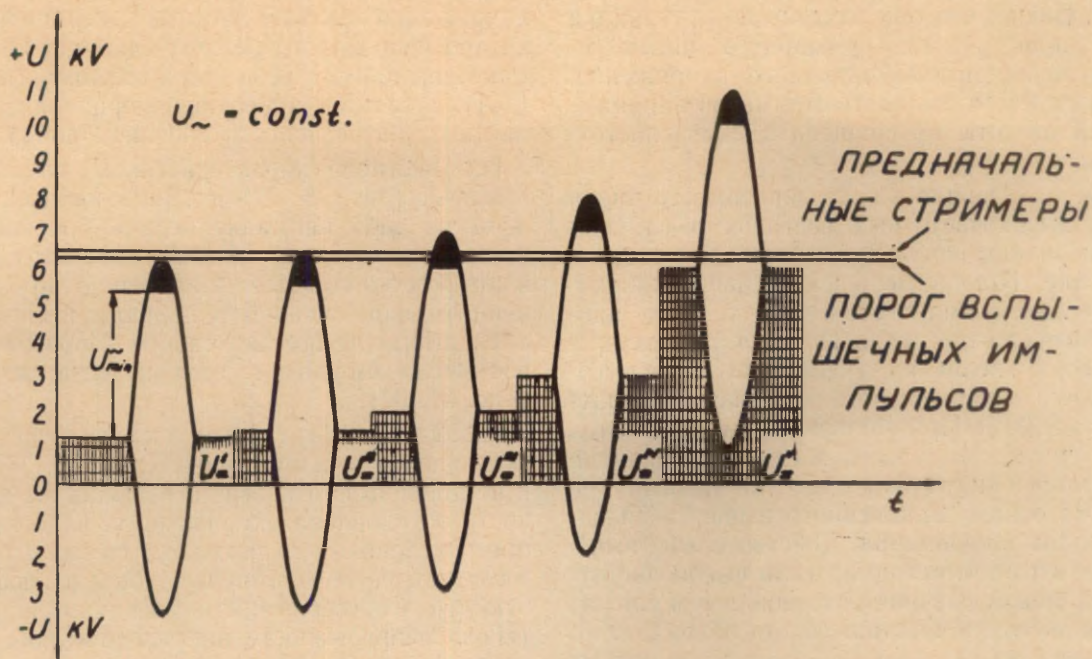


Рис. 41. Механизм прекращения высокочастотных вспышек с увеличением  $U_-$ .

Из изложенного можно заключить, что ширина области возникновения высокочастотных вспышек должна быть равной  $U_{\text{max}} - U_{\text{min}}$ . Это было бы точно так, если бы существовала резкая граница  $CC'$ , ниже которой наблюдались бы только стримеры, а выше — высокочастотные вспышки. На самом деле имеется целый интервал напряжений  $\Delta U_{\text{min}}$  в пределах которого возникают как высокочастотные вспышки, так и стримеры. О величине  $\Delta U_{\text{min}}$  можно судить по рис. 35. Существование  $\Delta U_{\text{min}}$  является одной из причин отсутствия абсолютно резкой границы между высокочастотными вспышками и стримерами, которую мы должны были наблюдать при постепенном увеличении  $U_-$  (см. также рис. 34 и 37).

Второй причиной, действующей в том же направлении, является статистический характер появления отрицательного иона в чувствительном объеме около поверхности острия. Если бы он, в случае  $U_- = U_{\text{IV}}$  или  $U_- = U_{\text{V}}$  (рис. 41), появился бы не в тот момент, когда величина приложенного к разрядному промежутку напряжения была равна порогу стримеров, а при  $U_- > U_{\text{min}}$ , то, очевидно, мы наблюдали бы высокочастотную вспышку, но не стример положительной короны. Чем меньше концентрация отрицательных ионов, тем больше вероятность такого события.

Все наши рассуждения относительно особенностей возникновения импульсов разряда на смешанном напряжении в случае модулированного высокочастотного напряжения подтверждаются счетными характеристиками на рис. 34 и 37. Из них особенно ясно следует, что счетная характеристика высокочастотных вспышек (или счетная характеристика счет-

чика ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты) — органическая часть счетной характеристики стримеров. Ее существование возможно только потому, что часть стримеров напряжением высокой частоты определенной величины превращается в высокочастотные вспышки.

В первой главе этой части мы говорили об условиях возникновения стримеров в случае немодулированного смешанного напряжения. По описанным опытам и рассуждениям можно заключить, что для любого острия (разрядного промежутка) найдутся такие  $\nu$ ,  $U_-$  и  $U_+$ , при которых выбранное смешанное напряжение по отношению к вероятности возникновения стримеров или высокочастотных вспышек на участках  $BCC'D$  вполне эквивалентно постоянному напряжению.

Для модулированного смешанного напряжения такой эквивалент мы тоже нашли. Им является напряжение, полученное путем одновременного питания разрядного промежутка постоянным напряжением и синусоидальным напряжением промышленной частоты.

Все, что было сказано выше относительно условий возникновения вспышечных импульсов и стримеров в случае модулированного высокочастотного напряжения, остается в силе и для эквивалентного напряжения. (Исключение составляют вопросы, связанные со временем образования стримеров и вспышечных импульсов. Порог возникновения указанных импульсов разряда был всегда равен порогу соответствующих импульсов постоянного напряжения. То же самое относится к величине стримеров).

Счетные характеристики стримеров эквивалентного или модулирующего напряжения представлены на

рис. 34 и 37. Видно, что они заметно не отличаются от счетных характеристик суммарного числа импульсов в условиях высокочастотного напряжения. В последнем случае лишь часть стримеров напряжением высокой частоты превращена в высокочастотные вспышки.

На рис. 34 и 37 видна также зависимость числа стримеров и высокочастотных вспышек в единицу времени от величины начальной ионизации в разрядном промежутке. При наименьшей концентрации ионов суммарное число импульсов в минуту было наибольшим и равнялось примерно  $3000 \text{ имп./мин}$ , не превышая, однако, эту величину (число импульсов высокочастотного или эквивалентного напряжения в минуту —  $50 \cdot 60 = 3000!$ ). При больших интенсивностях ионизатора, число импульсов в единицу времени меньше (имеются в виду высокочастотные вспышки и стримеры). На основе изложенного выше такая зависимость вполне закономерна. Действительно, выше мы убедились в том, что стример (или высокочастотная вспышка) может развиваться лишь в том случае, если ион не появится в чувствительном объеме около вершины острия в тот момент, когда  $U_{\text{всп}} < U < U_{\text{стр}}$ , а появится при  $U \geq U_{\text{стр}}$ . Чем больше начальная ионизация, тем больше вероятность появления иона при  $U < U_{\text{стр}}$ , тем вероятнее то, что вместо стримера или высокочастотной вспышки образуется самоподдерживающийся вспышечный импульс. Особенно сильным должно быть влияние начальной ионизации на число высокочастотных вспышек в режиме справа от максимума счетной характеристики. В этом случае для предотвращения возникновения высокочастотных вспышек достаточно того, чтобы начальный ион появился бы не в промежутке времени  $\Delta t_1$ , при котором  $U_{\text{всп}} < U < U_{\text{стр}}$ , а в промежутке  $\Delta t_2$  удовлетворяющем условию  $U_{\text{всп}} < U < U_{\text{мин}}$ ,  $U_{\text{мин}} = U_{-} + U_{\text{мин}}$ . Очевидно,  $\Delta t_2 \geq \Delta t_1$  (рис. 41).

#### В. О НЕКОТОРЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВСПЫШЕК И СТРИМЕРОВ НА ПРАКТИКЕ

Счетные характеристики высокочастотных вспышек на рис. 34 и 37 свидетельствуют о существовании весьма сильной зависимости числа высокочастотных вспышек в единицу времени от интенсивности ионизации в разрядном промежутке. Подобная зависимость позволила А. Прокофьеву осуществить счетчик ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты.

Возбудителями вспышек являются легкие отрицательные ионы, подвижностью больше  $0,47 \text{ см}^2/\text{В сек}$  [90, 91]. Счетчик, следовательно, может быть применен для счета ионов именно с такими подвижностями.

Из рис. 18 следует, что индикаторами ионов могут служить также стримеры короны постоянного или смешанного напряжения.

Режимы обоих типов счетчиков — счетчика ионов на преимущественно положительных полупериодах

напряжения высокой частоты и стримерного счетчика противоположны режиму счетчика Гейгера, в котором число импульсов (типа вспышечных импульсов [16]) находится в прямопропорциональной зависимости от интенсивности внешнего ионизатора.<sup>5</sup>

На счетных характеристиках высокочастотных вспышек (рис. 34, 37) и стримеров (рис. 18) обращает на себя внимание весьма большая крутизна кривых и отсутствие какого-либо плато. В счетчике, в котором электроды питаются модулированным смешанным напряжением и индикаторами ионов являются стримеры положительной короны или суммарное число импульсов, этот недостаток отсутствует (рис. 34, 37).

Наиболее эффективным, однако, будет счетчик на эквивалентном напряжении (рис. 34, 37). Он прост и не дорог в изготовлении. Высокая же чувствительность обусловлена, по-видимому, наиболее подходящими условиями образования самоподдерживающегося вспышечного импульса, определяющего в первую очередь вероятность возникновения стримера. (Из-за непрерывности напряжения любой ион, подходящий к острию при  $U \geq U_{\text{всп}}$  и при отсутствии пространственных зарядов, может образовывать вспышечный импульс. Последнее не действительно в случае модулированного высокочастотного напряжения).

Счетные характеристики описанного варианта счетчика при различных значениях амплитуды напряжения промышленной частоты представлены на рис. 38. Видно существование хорошего плато в пределах нескольких киловольт. Незначительна зависимость числа стримеров и от  $U_{-}$ .

Оба факта обусловлены, по-видимому, небольшой зависимостью крутизны фронта синусоидального напряжения промышленной частоты от величины пере-напряжения. Согласно этому промежутку времени  $\Delta t$ , в пределах которого к острию должен подходить отрицательный ион, необходимый для образования самоподдерживающегося вспышечного импульса, будет приблизительно одинаковым при всех использованных величинах перенапряжения (особенно, при значительных величинах перенапряжения). Так как изменение крутизны в зависимости от амплитуды все же существует, то чем меньше амплитуда переменного напряжения, или  $U_{+}$  при  $U_{-} = \text{const}$ , тем меньше крутизна и больше  $\Delta t$ . Последнее означает, что больше должна быть и вероятность образования самоподдерживающегося вспышечного импульса или, что то же самое, более чувствительно число стримеров в единицу времени к изменениям степени ионизации в разрядном промежутке (рис. 28). Этим же объясняются небольшие наклоны счетных характеристик как по  $U_{-}$ , так и по  $U_{+}$ .

<sup>5</sup> Отметим, что при выборе подходящей геометрии разрядного промежутка,  $\nu$ ,  $U_{-}$  или  $U_{+}$  и число стримеров или высокочастотных вспышек в единицу времени могли быть в прямой зависимости от концентрации ионов в разрядном промежутке. См. выше.

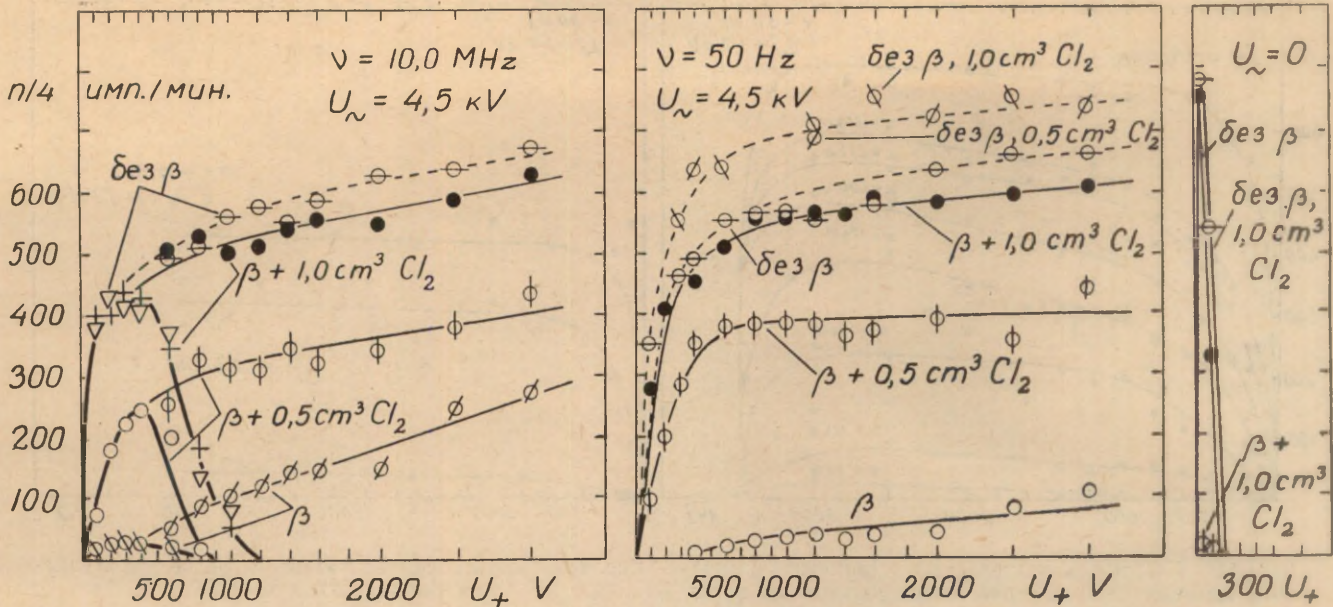


Рис. 42. Влияние примесей  $Cl_2$  в воздухе на число высокочастотных вспышек и стримеров в единицу времени. Разрядный промежуток 2, острие 2. Дополнительная ионизация создана  $\beta$ -активным источником, расположенным на расстоянии 20 см от входа трубы. Интенсивность  $\beta$ -источника эквивалента приблизительно 0,03 мг радия. Жирные кривые соответствуют высокочастотным вспышкам, остальные — стримерам положительной короны и суммарному числу импульсов.

Кроме счета ионов, счетчик на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты был рекомендован в качестве высокочувствительного индикатора примесей галогенов в атмосферном воздухе [2].

Идея использования счетчика индикатором галогенов основана на общеизвестном свойстве атомов этих элементов образовывать отрицательные ионы большими электронными средствами. Подобные ионы на расстояниях от поверхности острия, где ионы

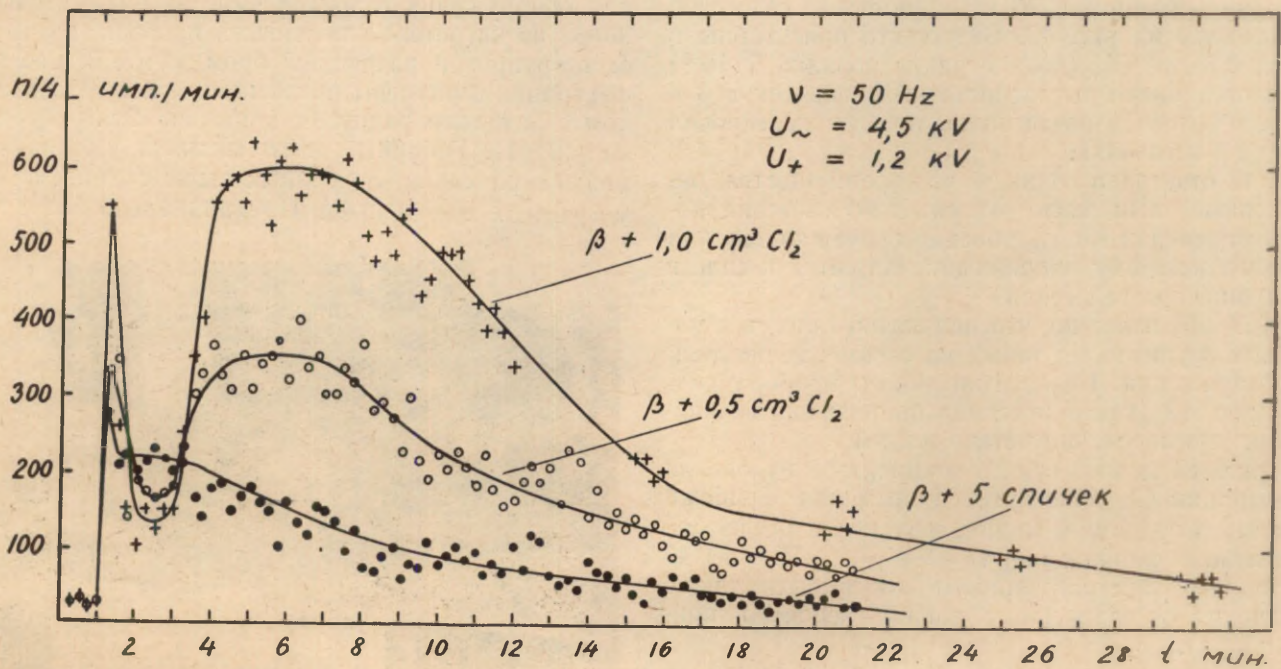


Рис. 43. Изменение концентрации  $Cl_2$  в воздухе со временем. Первоначальный пик соответствует к моменту введения  $Cl_2$  в комнату, 3—4 мин. потребовалось на равномерное перемешивание  $Cl_2$  с воздухом. Этому следует относительно медленная диффузия. Из рисунка видно, что зарегистрированы могут быть и загрязнения от зажженных спичек.

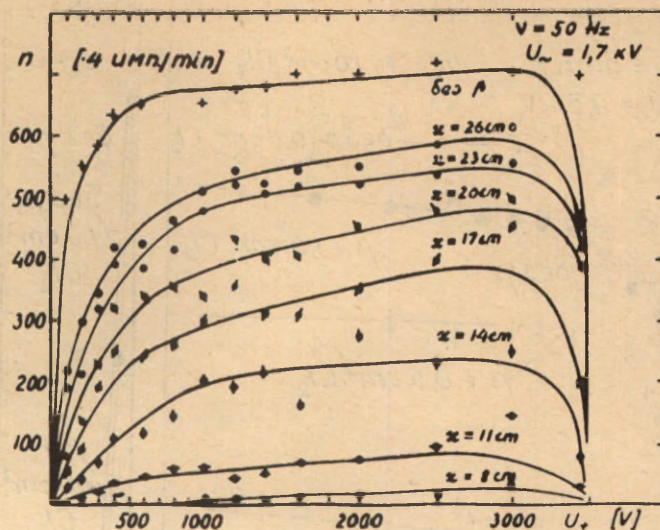


Рис. 44а. Счетные характеристики стримеров разрядного промежутка 3.  $x$  — расстояние  $\beta$ -активного источника от входа счетчика. (Интенсивность  $\beta$ -источника эквивалентна приблизительно  $0,03 \text{ mg}$  радия).

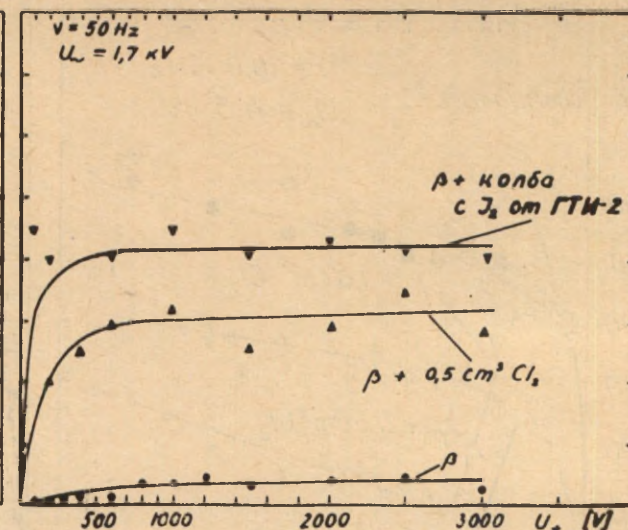


Рис. 44б. Сравнение индикатора галоидов на стримерах с теченскателем ГТИ-2.

кислорода уже распадаются и отдают начальные электроны для образования вспышечного импульса, будут еще вполне устойчивыми. Их присутствие в объеме счетчика, следовательно, равноценно уменьшению начальной ионизации в разрядном промежутке. Последнее, согласно изложенному выше, должно привести к увеличению числа высокочастотных вспышек в единицу времени.

Счетные характеристики импульсов разряда при наличии в атмосферном воздухе (в помещении лаборатории объемом в  $70 \text{ m}^3$ ) примесей галогенов представлены на рис. 42. Видно, что присутствие в воздухе  $0,5 \text{ cm}^3 \text{ Cl}_2$  (концентрация порядка  $5 \cdot 10^{-8}$ ) увеличивает число высокочастотных вспышек в 3—10 раз.  $1 \text{ cm}^3 \text{ Cl}_2$  почти полностью скомпенсировал действие  $\beta$ -источника.

Рис. 42 отчетливо покажет, что преимущества, перечисленные нами выше относительно счетчика ионов на стримерах модулированного смешанного или эквивалентного ему напряжения, остаются в силе и для индикатора галогенов.

Из [53, 55] известно, что индикатор галогенов может быть осуществлен также на стримерах постоянного напряжения. Недостатки такого прибора видны на рис. 42 (узкий интервал напряжений возникновения стримеров, отсутствие плато).

По рис. 43 можно судить о характере изменения концентрации  $\text{Cl}_2$  в воздухе со временем. Графики получены посредством индикатора галоидов на эквивалентном напряжении  $U_- + U_{50\text{Hz}}$ . Из рис. 43 следует, что зарегистрированы могут быть также загрязнения от зажженных спичек (вероятно, примеси хлора).

В введении мы отметили, что счетчик ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты в своем первоначальном виде был весьма громоздким и из-за этого не нашел

непосредственного практического применения. (Длина цилиндрического электрода  $3,5 \text{ m}$ , диаметр  $15 \text{ cm}$ . Диаметр острия  $0,5 \text{ cm}$ . Пороговые напряжения высокочастотных вспышек  $\sim 12 \text{ kV}$  [2]). Шагом вперед в направлении уменьшения габаритов счетчика является описанный здесь разрядный промежуток 2.

С целью сравнения счетчика ионов на стримерах положительной короны в качестве индикатора галоидов с выпускаемым нашей промышленностью галоидным теченскателем ГТИ-2, в котором используется для обнаружения галоидов эмиссия положительных ионов из нагретого платинового провода, нами был сконструирован разрядный промежуток 3. Его конфигурация и размеры показаны на рис. 10. Электродом с наименьшим радиусом кривизны было острие 3 на рис. 11. Габариты этого счетчика уже намного меньше размеров, описанных выше счетчиков. Они могут быть еще меньше. Принципиально более пор-

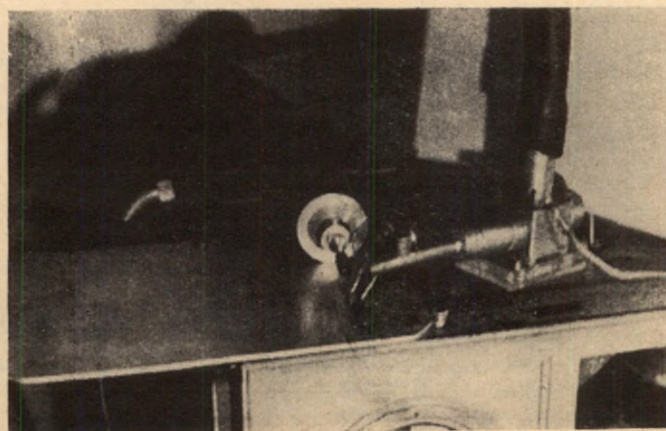


Рис. 45. Схема сравнения индикатора галоидов на стримерах с теченскателем ГТИ-2.

тативным по сравнению со счетчиком ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты будет счетчик на стримерах положительной короны.

С уменьшением габаритов понижаются и пороговые напряжения стримеров. В разрядном промежутке 3  $U_{стр} = 4 \text{ kV}$ .

Счетные характеристики стримеров разрядного промежутка 3 представлены на рис. 44а. Различная интенсивность начальной ионизации достигалась путем расположения  $\beta$ -источника на разные расстояния от входа счетчика.

Сравнение счетчика ионов на стримерах как индикатора галоидов с течеискателем ГТИ-2 было осуществлено по схеме, представленной на рис. 45. Рас-

стояние между входами обоих приборов было порядка 2 см. Симметрично к входам на расстоянии 2 см от обоих лежала колба с  $I_2$  от ГТИ-2.

На таком расстоянии течеискателем ГТИ-2 присутствия галоидов не обнаруживал. Число стримеров же в единицу времени возрастало примерно в 16 раз. Не замеченным течеискателем ГТИ-2 оставалось также  $0,5 \text{ cm}^3 \text{ Cl}_2$  в лабораторном воздухе. Индикатором галоидов на стримерах присутствие  $\text{Cl}_2$  было зарегистрировано отчетливо (рис. 44б).

Сравнения, следовательно, между собой чувствительностей течеискателя галоидов ГТИ-2 и индикатора галоидов на стримерах положительной короны показывают, что второй чувствительнее первого, по меньшей мере, на целый порядок величины.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приступая к работе, мы ставили своей задачей выяснить принцип действия счетчика ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты, найти возможности его практического применения, а также исследовать начальные стадии разряда с острия.

Исследования начались с систематизации всевозможных форм разряда, возникающих при одновременном наложении на острие постоянного напряжения  $U_{\pm}$  и напряжения высокой частоты  $U_{\sim}$  (диапазон частот  $1,25 \cdot 10^6$  —  $40 \cdot 10^6$  Hz) в различных соотношениях. Эта систематизация со всеми вытекающими из нее последствиями является главным результатом настоящего исследования.

Систематизация форм разряда в работе представлена в виде систематизирующих, вольт-вольтовых и счетных характеристик разряда. Характеристики были получены в условиях лабораторного воздуха для различных острий и конфигураций разрядного промежутка.

Систематизирующие характеристики посредством многочисленных фотографий и осциллограмм дают представление о формах разряда, наблюдающихся в разрядном промежутке при различных значениях  $U_{\pm}$  и  $U_{\sim}$ . На смешанном напряжении (форма напряжения, полученная путем сложения постоянного напряжения и напряжения высокой частоты) в зависимости от соотношения между  $U_{\pm}$  и  $U_{\sim}$  наблюдаются как виды разряда, напоминающие импульсы короны постоянного напряжения (вспышечные импульсы, предначальные стримеры, непрерывная вспышечная корона, предпробойные стримеры), так и форма разряда, похожая на высокочастотный разряд. Заметно влияет на форму импульсов разряда частота высокочастотных колебаний.

Вольт-вольтовые характеристики дают возможность определить значения  $U_{\pm}$  и  $U_{\sim}$ , при которых возникают различные виды разряда на смешанном напряжении. Из вольт-вольтовых характеристик видно, что конфигурация области возникновения стримеров сильно зависит от частоты, величины  $U_{\pm}$  и  $U_{\sim}$ , а также от радиуса кривизны острия. На основе представлений, известных относительно короны по-

стоянного напряжения, этому факту дается объяснение.

Порог возникновения вспышечных импульсов и стримеров на смешанном напряжении, начиная с определенной частоты, зависящей от радиуса кривизны острия, выше, чем порог соответствующих импульсов короны постоянного напряжения. По этим данным можно было вычислить время образования стримера и его зависимость от величины перенапряжения.

Для различных острий и величин перенапряжения время формирования стримера получилось равным  $2,5 \cdot 10^{-8}$ — $0,5 \cdot 10^{-8}$  sec.

Из вольт-вольтовых характеристик следует, что в некоторых интервалах изменений  $U_{\pm}$  и  $U_{\sim}$  области возникновения высокочастотных вспышек являются естественными продолжениями областей возникновения стримеров.

Последнее со всей наглядностью свидетельствует о том, что в определенных условиях высокочастотная вспышка развивается из стримера положительной короны. Предлагается возможный механизм образования высокочастотной вспышки из стримера. Для того чтобы стример развивался в высокочастотную вспышку, необходимо, чтобы некоторая часть электронов к наступлению отрицательного полупериода напряжения высокой частоты оставалась бы в канале стримера. Постепенное увеличение с помощью этих электронов от полупериода к полупериоду ионизации в первоначальном канале стримера и образует высокочастотную вспышку. Процесс формирования высокочастотной вспышки сравнительно медленный. На основе осциллограмм время образования высокочастотной вспышки порядка  $10^{-3}$ — $10^{-4}$  sec.

Исследовалось влияние модуляции напряжения высокой частоты на условия возникновения импульсов разряда. Последнее окончательно позволило охарактеризовать механизм действия счетчика ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты. Счетчик ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты — это разновидность счетчика на стримерах положительной короны. Его существование возможно благодаря тому, что стримеры, возникающие при  $U_{\sim} \geq U_{\min}^*$ , напряжением высокой частоты превращаются в высокочастотные вспышки. Счетчик может работать не только на частоте боль-

ше 10  $MHz$ , как это предполагалось раньше, но и на частотах вплоть до 1  $MHz$ . Слишком сильная ионизация полностью прекращает возникновение высокочастотных вспышек в счетчике ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты.

Предлагаются новые типы счетчиков ионов:

а) Счетчик, электроды которого питаются одновременно постоянным напряжением и модулированным напряжением высокой частоты, причем счет ионов ведется по стримерам положительной короны.

б) Счетчик, питание которого осуществляется постоянным напряжением и синусоидальным напряжением частоты в 50  $Hz$ .

Указанные счетчики могут быть использованы в качестве малогабаритных, безынерционных и высоко-

чувствительных индикаторов галоидов (особенно последний тип счетчика).

Исследования проводились в 1955—1958 гг. на кафедре общей физики ЛГПИ им. А. И. Герцена.

За постоянный интерес к работе и за ценные указания автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю Александру Михайловичу Прокофьеву. Признателен Олегу Федоровичу Кабардину, аспиранту в прошлом, а ныне коллеге, разрешавшему в начальных стадиях работы пользоваться своей установкой и принимавшему активное участие в обсуждениях некоторых результатов исследования. Интерес к работе проявляли также аспиранты Виктор Васильевич Старков и Александр Александрович Жуков, содействуя тем самым проведению исследования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Прокофьев А. М., ЖЭТФ, 7, 990, 1937.
2. Ковалева Н. Х., Диссертация к. н., ЛГПИ, 1954.
3. Савукова Н. Х., Труды научной конф. Сталинского пед. инст., 1, 1955.
4. Капцов Н. А., Коронный разряд, 1947.
5. Chattock, A. P., Phil. Mag., 32, 285, 1891.
6. Chattock, A. P., Phil. Mag., 48, 40, 1899.
7. Chattock, A. P., Phil. Mag., 20, 266, 1910.
8. Chattock, A. P., Tyndall, A. M., Phil. Mag., 20, 277, 1910.
9. Warburg, E., Ann. Physik, 66, 682, 1898.
10. Warburg, E., Ann. Physik, 67, 691, 1899.
11. Warburg, E., Ann. Physik, 18, 128, 1905.
12. Toepler, M., Ann. Physik, 2, 560, 1900.
13. Tyndall, A. M., Phil. Mag., 24, 424, 1910.
14. Zeleny, J., Phys. Rev., 16, 102, 1920.
15. Loeb, L. B., Leigh, W., Phys. Rev., 51, 149, 1937.
16. Loeb, L. B., Basic Processes of Gaseous Electronics, 1955.
17. Caunt, H. M., Graggs, J. D., Nature, 167, 647, 1951.
18. Caunt, H. M., Graggs, J. D., Nature, 168, 859, 1951.
19. Wagner, L., Arch. Elektrotechn., 40, 331, 1952.
20. Saxe, R. F., Nature, 173, 592, 1954.
21. Siksna, R., Ark. Fys., 9, Nr. 6, 77, 1955.
22. Siksna, R., Ark. Fys., 9, Nr. 7, 1955.
23. Murphy, B., Nature, 176, 397, 1955.
24. Guck, R. W., Die negative Koronaentladung in der Spitze-Platte Funkenstrecke, dissert., Karlsruhe, 1955.
25. Andersson, N. E., Ark. Fys., 13, 399, 1958.
26. Andersson, N. E., Ark. Fys., 13, 441, 1958.
27. Александров Г. Н., ЖТФ, 26, 1769, 1956.
28. Александров Г. Н., ЖТФ, 26, 2632, 1956.
29. Rutherford, E., Geiger, H., Proc. Roy. Soc., A 81, 141, 1908.
30. Векслер В., Грошев Л., Исаев Б., Ионизационные методы исследования излучений, М.—Л., 1949.
31. Bandel, W., Phys. Rev., 84, 92, 1951.
32. Amin, M. R., J. Appl. Phys., 25, 210, 1954.
33. Trichel, G. W., Phys. Rev., 55, 382, 1938.
34. Kip, A. F., Phys. Rev., 55, 549, 1939.
35. Amin, M. R., J. Appl. Phys., 25, 358, 1954.
36. Sanders, F. H., Phys. Rev., 41, 667, 1932, 44, 1020, 1933.
37. Лёб Л., Основные процессы электрических разрядов в газах, М.—Л., 1950.
38. Loeb, L. B., Parker, J. H., Dodd, E. E., English, W. N., Rev. Sci. Instr., 21, 42, 1949.
39. Kip, A. F., Phys. Rev., 54, 139, 1938.
40. Cravath, A. M., Phys. Rev., 47, 254, 1935.
41. Dechene, C. J., Phys. Radium, 7, 533, 1936.
42. Loeb, L. B., Wijsman, R. A., J. Appl. Phys., 19, 797, 1948.
43. Fitzsimmons, K. E., Phys. Rev., 61, 175, 1942.
44. Flügge, S., Handbuch der Physik, Bd. 22, 1956.
45. Loeb, L. B., J. Appl. Phys., 19, 882, 1948.
46. Loeb, L. B., Phys. Rev., 94, 227, 1954.
47. English, W. N., Phys. Rev., 77, 850, 1950.
48. Гей В. В., Зайенц С. Л., ЖЭТФ, 17, вып. 5., 1947.
49. Menes, M., Fisher, L. H., Phys. Rev., 94, 1, 1954.
50. Loeb, L. B., Kip, A. F., J. Appl. Phys., 10, 142, 1939.
51. Andersson, N. E., Hertz, C. H., ZS. Physik, 7, Hf. 8, 1955.
52. Weissler, G. L., Phys. Rev., 57, 253, 1940.
53. Weissler, G. L., Phys. Rev., 63, 96, 1943.
54. Pollock, H. C., Cooper, F. S., Phys. Rev., 56, 170, 1939.
55. Mohr, E. I., Weissler, G. L., Phys. Rev., 72, 294, 1947.
56. Amin, M. R., J. Appl. Phys., 25, 627, 1954.
57. Капцов Н. А., Электроника, Москва, 1956.
- 57а. Капцов Н. А., Электрические явления в газах и в вакууме, М.—Л., 1950.
58. Misere, F., Arch. Elektrotech., 289, 411, 1934.
59. Daubensbeck, O., Arch. Elektrotech., 30, 581, 1936.
60. Lange, K., Arch. Elektrotech., 31, 411, 1939.
61. Большакова Н. Ф., Дипл. работа, МГУ, Физ. фак., 1955.
62. Петров П. А., Кузовников А. А., Вестник МГУ, серия ф.-м. наук, 4, 1956.
63. Зилитникович С. И., Телегр. и телеф. без проводов, 9, № 6, 1928.
64. Вахтер, К., Radio News, 5, 1204, 1928.
65. Heinrich, K., E. T. Z., 46, 1656, 1929.
66. Хохлов М. З., Автореф. диссерт. к. н., МГУ, 1953.
67. Столов А. Л., Автореф. диссерт. к. н., Казань, 1956.
68. Матвеев Я., ЖТФ, 11, 1054, 1941.
69. Cristescu, G. D., Grigorovici, R., Reveue de Physique, 1, 103, 1956.
70. Прокофьев А. М., Вопросы exper. мет., 1, вып. 1, 1941.
71. Попов Л. В., Романов И. М., Гарифьянов Н. С., Уч. записки Казанского ГУ, 117, кн. 2, 1957.
72. Столов А. Л., Уч. записки Казанского ГУ, 117, кн. 2, 1957.
73. Нейман М. С., Изв. электропром. слабого тока, 7, 1935.
74. Солнцев Г. С., Автореф. диссерт. к. н., МГУ, 1952.
75. Гоноровский И. С., Изв. электропром. слабого тока, 12, 11, 1939.
76. Прокофьев А. М., Труды Лен. ин-та эксп. мет., 1, 1937.
77. Asami, N., Hori, T., Nature, 144, 891, 1939.
78. Мочалов К. Н., ДАН СССР, 97, 241.
79. Мочалов К. Н., Никифоров А. Я., Богоносцев А. С., ЖЭТФ, 20, 474, 1950.
80. Попов Л. В., Столов А. Л., Уч. записки Казанского ГУ, 113, кн. 9, 1953.
81. Столов А. Л., Уч. записки Казанского ГУ, 116, кн. 5, 1956.
82. Солнцев Г. С., Хохлов М. С., Родина Е. А., ЖЭТФ, 22, 406, 1952.
83. Кузовников А. А., Автореферат диссерт. к. н., МГУ, 1955.
84. Cobine, J. D., Wilbur, D. A., J. Appl. Phys., 22, 835, 1951.
85. Прокофьев А. М., ЖЭТФ, 7, 987, 1937.
86. Мочалов К. Н., ДАН СССР, 18, № 6, 1938.

87. Мочалов К. Н., ДАН СССР, 20, № 4, 1938.
88. Серебряков П. А., ЖФХ, 19, вып. 2, 1940.
89. Прокофьев А. М., ЖЭТФ, 9, 1393, 1939.
90. Прокофьев А. М., ЖТФ, 18, 601, 1948.
91. Прокофьев А. М., ЖТФ, 20, 802, 1950.
92. Кабардин О. Ф., Уч. записки Чкаловского пединст., 11, 249, 1957.
93. Прокофьев А. М., Старков В. В., Выступление на Второй Всесоюзной конференции по газовой электронике 2—10 окт. 1958.
94. English, W. N., Loeb, L. V., J. Appl. Phys., 20, July, 1949.
95. Menes, M., Fisher, L. H., Phys. Rev., 84, 1075, 1951.
96. Menes, M., Phys. Rev., 82, 569, 1951.
97. Браго Е. М., Стекольников И. С., Изв. Ак. наук СССР, отд. техн. наук, 11, 50, 1958.
98. Volerath, K., Photogr. et cinematogr. ultrarapides, Paris, Dunod, 31, 1956.
99. Под ред. Клярфельда Б. Н., Исследования в области электр. разряда в газах, М.—Л., 1958.
100. Акопян А. А., Ларионов В. Л., Моросян А. С., Электричество, 5, 14, 1956.
101. Mollwo, L., Ann. Physik, 7, 97, 1958.
102. Trunsek, V., Spisy vyd. prirodoved, fak Masarykovy univ. 4, 205, 1957.  
См. также [103, 104, 105, 106, 107], вышедшие из печати после оформления исследования:
103. Кабардин О. Ф., Изв. Высших учебных заведений, 6, 51, 1958.
104. Григорович Р., Кристеску Дж., Оптика и спектроскопия, 6, вып. 2, 129, 1959.
105. Кузовников А. А., Научные доклады высшей школы, 4, 191, 1958.
106. Прокофьев А. М., Уч. записки ЛГПИ им. А. И. Герцена, 197, 180, 1958.
107. List, G., Experim. Techn. Phys., 6, Heft 5, 223, 1958.

## TERAVIKLAHENDUSE ALGSTAADIUMIDEST ÖHUS

### RESUMEE

Käesoleva monograafia autor püstitas eesmärgiks peamiselt positiivsete kõrgesageduspinge poolperioodidel töötava ionide loendaja töötamis põhimõtte väljaselgitamise.

Ülalnimetatud ionide loendaja konstrueeriti A. Prokofjevi poolt 1937. a. alustatud uurimuste tulemusena. Loendaja kujutab enesest tavalistesse atmosfääri tingimustesse paigutatud tugevasti mittehomogeenset lahendusvahemikku, millele on üheaegselt rakendatud nii alalis- kui kõrgesageduspinge.

Uurimusi alustati teraviku ümbruses esinevate kõikvõimalike iseseisva elektrilahenduse liikide süstematiseerimisega juhul, kui elektroodidele rakendatakse üheaegselt alalis- ja kõrgesageduspinget mitmesugustes proportsioonides. Nimetatud süstematiseerimine koos kõigi siit tulenevate järeldustega ongi uurimuse peamiseks resultaadiks. Töö käigus määrati erinevate lahendusvormide esinemise pinge- piirkonnad. Viimane näitab täie selgusega, et teatud kindlates tingimustes kõrgesageduslahenduse sähvatus moodustub positiivse koroona striimerist. Katseandmete põhjal õnnestus välja arvutada striimeri moodustumisaeg ning selle sõltuvus ülepingsest. Viimase suurus mitmesuguste teravike ning ülepinge

väärtuste puhul on võrdne  $2,5 \cdot 10^{-8} - 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ sec}$ . Kõrgesagedussähvatuste moodustumisaeg on  $10^{-3} - 10^{-4} \text{ sec}$ .

Uurimusi teostati ka kõrgesageduspinge modulatsiooni mõju kohta lahenduse tekkimisele. Viimane võimaldas lõplikult karakteriseerida ionide loendaja töötamisprintsipi: peamiselt positiivsetel kõrgesageduspinge poolperioodidel töötav ionide loendaja ei ole midagi muud kui positiivse koroona striimeritel põhineva ionide loendaja modifikatsioon. Tema olemasolu on võimalik tänu sellele, et striimerid, millede ilmumismoment rahuldab tingimust:  $U \geq U_{\min}$ , suure sagedusega pinge poolt muudetakse kõrgesageduspinge sähvatuseks;  $U$  — kõrgesageduspinge amplituud vaadeldaval ajamomendil,  $U_{\min}$  — minimaalne kõrgesageduspinge amplituud, mille puhul tekivad sähvatused.

On konstrueeritud uut tüüpi portatiivne ja ulatuslikku platood omav (mitmed kilovoldid) ionide loendaja. Loendaja töötab režiimil, mil elektroode toidetakse üheaegselt alalis- ja 50 Hz-lise siinuspingega. Kirjeldatud ionide loendajat võib kasutada suure tundlikkusega haloidide indikaatorina.

## ABOUT THE INITIAL STATES OF POINT-DISCHARGES IN AIR

### SUMMARY

In this work an account is given for a new type of ion-counter. The counter was constructed by A. Prokofyev as a result of experiments begun in 1937. The counter represents an open-air point-to-plane or other point-type discharge gap, whose point electrode has at the same time a d. c. and a high frequency (h. f.) potential.

The author has systematized all the forms of self-sustaining point discharges that occur in the gap if the relation between d. c. and h. f. potentials is

varied over a large range. This systematization with all conclusions is the general result of experiments. Dislocation of domains of burst pulses, corona streamers, steady burst pulse corona and h. f. bursts show that under certain conditions the h. f. bursts are initiated by positive corona streamers (by pre-onset or pre-breakdown streamers). On the basis of experimental results it was possible to calculate the formation time of streamers and its dependence on overpotential. The formation time of streamers for different points and overpotentials is  $2,5 \cdot 10^{-8} -$

—  $0,5 \cdot 10^{-8}$  sec. The formation time of h. f. bursts is  $10^{-3} - 10^{-4}$  sec.

Investigated was also the modulation of h. f. potential to the initiating conditions of h. f. discharge. These later experiments finally clear up the principle of action of the abovementioned h. f. ion-counter: this h. f. counter is a modification of a streamer-counter. It can exist thanks to the fact that streamers, whose initiating potential satisfy the condition:  $U_{\sim} \geq U_{\sim \min}$ ,

by h. f. potential are converted into h. f. bursts; here  $U_{\sim}$  is the amplitude of h. f. potential at a given moment of time,  $U_{\sim \min}$  — minimum value of  $U_{\sim}$  that can convert streamers into h. f. bursts.

A new type of portable ion-counter is proposed. The counter electrodes should have at the same time d. c. and 50-cycle sinus-potentials. This counter has a large plateau (some kilovolts) and can be employed as a very sensible halogen indicator.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	3
Часть I	
Глава 1. Коронный разряд в воздухе с положительно заряженного острия . . . . .	4
Глава 2. Факельный счетчик ионов. Счетчик ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты . . . . .	9
Часть II	
А. Постановка задачи исследования . . . . .	13
Б. Экспериментальная установка . . . . .	14
а) Разрядные промежутки . . . . .	14
б) Генератор высокой частоты . . . . .	15
в) Источники постоянного напряжения и напряжения низкой частоты . . . . .	15
г) Приборы для визуального и фотографического наблюдений . . . . .	17
д) Измерительная аппаратура . . . . .	17
Часть III	
Результаты эксперимента и их обсуждение	
Глава 1. Исследования различных характеристик разряда при одновременном наложении на острие постоянного напряжения и напряжения высокой частоты . . . . .	19
А. Систематизирующие характеристики разряда (разрядный промежуток 1, острие 2) . . . . .	19
Б. Вольт-вольтовые характеристики разряда (разрядный промежуток 1, острия 1, 2, 3, 4, 5) . . . . .	23
В. Обсуждение результатов исследований. Дополнительные данные	29
а) Зависимость ширины области возникновения стримеров от частоты, $U_{\text{н}}$ и $U_{\text{п}}$ . . . . .	29
б) Влияние радиуса кривизны вершины острия на области напряжений возникновения стримеров . . . . .	30
в) Области напряжений возникновения стримеров и области возникновения высокочастотных вспышек ВСС'Д . . . . .	32
г) Повышения пороговых напряжений импульсов положительной короны на смешанном напряжении . . . . .	33
д) О механизме образования высокочастотной вспышки из стримера положительной короны . . . . .	34
Глава 2. Влияние модуляции напряжения высокой частоты на характеристики разряда. Счетчик ионов на преимущественно положительных полупериодах напряжения высокой частоты . . . . .	38
А. Вольт-вольтовые и счетные характеристики . . . . .	38
а) Разрядный промежуток 1, острие 2 . . . . .	38
б) Разрядный промежуток 2, острие 2 . . . . .	38
Б. Обсуждение . . . . .	38
В. О некоторых возможностях использования высокочастотных вспышек и стримеров на практике . . . . .	46
Заключение . . . . .	50
Литература . . . . .	52
Резюме на эстонском и на английском языках . . . . .	54

